MBL/WHOI
0 0301 0010096 2

F.-A. FOREL

LE LÉMAN

MONOGRAPHIE LIMNOLOGIQUE

TOME SECOND

LAUSANNE
F. ROUGE, ÉDITEUR
Librairie de l'Université
4, RUE HALDIMAND, 4

1895

LE LÉMAN

LE LÉMAN. Pl. I. Echelle 1 : 350,000.

Réduction de la carte suisse, autorisée par le Bureau topographique fédéral.

Kümmerly frères, Berne.

F.-A. FOREL

LE LÉMAN

MONOGRAPHIE LIMNOLOGIQUE

TOME SECOND

LAUSANNE
F. ROUGE, ÉDITEUR
Librairie de l'Université
4, RUE HALDIMAND, 4

1895

LAUSANNE — IMPRIMERIE CHARLES PACHE

PRÉFACE

En terminant ce second volume, je dois exprimer ma reconnaissance à MM. E. Chuard, à Lausanne, A. Delebecque, à Thonon, Ch. Dufour, à Morges, Henri Dufour, à Lausanne, L. Duparc et R. Gautier, à Genève, Ed. Hagenbach, à Bâle, J. Hörnlimann, à Berne, Marius Jaccard, à Lausanne, J. Piccard, à Bâle, Ph. Plantamour et Ed. Sarasin, à Genève, F. Seiler, à Lausanne, Ch. Soret, à Genève, J. Thoulet, à Nancy, qui ont bien voulu réviser certaines parties de mon livre et en corriger les imperfections, ou bien me communiquer des matériaux qui m'ont été utiles.

Dr F.-A. Forel,
professeur à l'Université de Lausanne.

Morges, novembre 1894.

11571

Noms et termes locaux, indigènes ou peu connus.

Anthélie, le point de l'espace opposé au soleil.
Bathythermomètre, instrument qui sert à mesurer la température des couches profondes de l'eau.
Baye, torrent du pays de Montreux.
Beine, terrasse littorale immergée (voyez t. I, p. 75).
Benaco, lac de Garde.
Bise, vent du nord-est.
Bodan, lac de Constance.
Ceresio, lac de Lugano.
Climatique, pour climatologique (voyez note de la p. 296).
Dicrote, à deux temps. Seiches dicrotes (voyez p. 113).
Eau bleue, la partie du lac assez profonde pour qu'on n'y voie plus le fond.
Gloire, couronne lumineuse entourant l'ombre de la tête de l'observateur (voyez p. 446).
Iris, spectre de dispersion étalé à la surface du lac (p. 504).
Joran, vent du nord-ouest.
Lario, lac de Côme.
Limnographe, appareil qui dessine les dénivellations de l'eau (voyez p. 90).
Mont, talus de la beine (voyez t. I, p. 77).
Morget, brise de terre, brise nocturne.
Palafitte, ruine d'un village antique, établi sur pilotis dans la beine du lac.
Plémyramètre, appareil pour l'observation des seiches (voyez p. 88).
Rebat, brise de lac, brise diurne.
Séchard, synonyme de rebat.
Seiche, dénivellation rythmique de l'eau, vague d'oscillation fixe d'un lac (voyez p. 39, sq.).
Sudois, vent du sud-ouest.
Vaudaire, vent du sud-est, le föhn du Haut-lac.
Vauderon, brise soufflant dans la direction de la vaudaire.
Verbano, lac Majeur.
Vibrations, oscillations de l'eau du lac, de courte périodicité (voyez p. 213).

Signes et abréviations.

RPN.	Repère de la Pierre du Niton à Genève (voyez t. I, p. 18).
ZL.	Zéro limnimétrique du Léman, étiage du lac (voyez t. I, p. 454).
S. V. S. N.	Société vaudoise des sciences naturelles.
S. H. S. N.	Société helvétique des sciences naturelles.
Archives de Genève.	Archives des sciences physiques et naturelles publiées à Genève.
18^h	6 heures du soir. Je numérote les heures à l'italienne, en une série unique de 24 heures, commençant à minuit.
$10^{m\ sec}$	10 mètres à la seconde (vitesse d'un courant).
$150^{m3\ sec}$	150^{m3} à la seconde (débit d'un fleuve).
Dufour [loc. cit. p. 32] p. 213, signifie page 213 de l'ouvrage de Dufour cité à la page 32 de ce volume.	

(Pour les autres signes, j'ai suivi la notation du Bureau international des poids et mesures).

ERRATA

Page 462, dernière ligne. *Au lieu de* maximum, *lisez* minimum.

Page 462, note 2, ligne 1, et page 463, ligne 24. *Au lieu de* Chevreuil, *lisez* Chevreul.

LE LÉMAN

SIXIÈME PARTIE

HYDRAULIQUE [1]

Je traiterai dans cette partie de mon livre ce qui touche à l'hydrostatique, c'est-à-dire à l'état de l'eau en repos, et à l'hydrodynamique, c'est-à-dire à l'état de l'eau en mouvement.

Dans la partie précédente, nous avons étudié les variations de hauteur qui se manifestent sur l'ensemble du lac, sous l'influence des différences de débit entre les affluents et l'émissaire. Nous avons actuellement à nous occuper des diverses déviations à l'horizontalité relative de la nappe du lac qui sont causées par des forces statiques ou dynamiques, agissant sur l'eau. Ces actions sont nombreuses et d'ordres fort divers et elles causent des dénivellations qui sont, les unes constantes, les autres temporaires.

Nous aurons ainsi à étudier :

La forme même du lac, partie du sphéroïde terrestre ;

[1] Je préfère donner à cette partie le titre de hydraulique, plutôt que celui de mécanique que je lui avais attribué dans mon introduction (t. I, p. 13) ; toute la mécanique dont j'ai à parler ici est la mécanique des eaux ; c'est donc de l'hydraulique.

Les dénivellations constantes de cause géostatique (attraction des côtes) ;

Les dénivellations constantes de cause hydrostatique (le courant propre du lac) ;

Les dénivellations temporaires de cause astronomique (marées) ;

Les dénivellations temporaires continues de cause atmosphérique ;

Les dénivellations temporaires rythmiques (les seiches) ;

Les vibrations du lac ;

Les vagues ;

Les courants locaux.

Nous commencerons par quelques mots sur la pression hydrostatique.

I. Pression hydrostatique.

La pression hydrostatique, est la pression exercée sur un corps par la colonne verticale du liquide dans lequel il est plongé, cette colonne ayant pour base la section horizontale du corps et pour hauteur la verticale entre le corps et la surface du liquide.

A la surface de l'eau, la pression est égale à la pression de l'atmosphère au-dessus du point considéré ; le Léman ayant sa nappe à une altitude de 372^{m}, la pression moyenne de l'atmosphère y est de 729.1^{mm} de mercure, soit 991^{gr} par centimètre carré.

Pour un corps plongé dans l'eau, la pression s'accroît, en nombre rond, d'une atmosphère par chaque 10^{m} d'eau. Plus exactement : si nous admettons qu'à la surface de la mer la pression moyenne de l'atmosphère soit de 760^{mm} de mercure, la valeur d'une atmosphère sera représentée par un poids de 1033^{gr} par centimètre carré de surface, ou par une colonne de 10.33^{m} d'eau distillée à 4° C ; autrement dit, chaque 10^{m} de profondeur d'eau douce augmentera la pression de 0.97 atmosphère.

La différence de densité qui résulte des différences de la température de l'eau ne modifie pas sensiblement ce chiffre. L'eau de la surface, qui a, en été, 20°, est un peu plus légère, et il faut une épaisseur de 10.35^{m} au lieu de 10.33^{m} pour représenter la valeur d'une atmosphère. Il n'y a pas lieu de tenir compte d'une différence aussi minime.

Y a-t-il lieu de faire intervenir la densité propre de l'eau du lac qui n'est pas de l'eau distillée, mais qui tient en dissolution des sels divers et dont la densité est, comme nous le verrons, 1.000 18, l'eau distillée étant 1.000 00. De ce fait aussi, la différence de la pression hydrostatique est minime : Une colonne d'eau distillée d'un centimètre de section, de 300m de hauteur, pèse 30 000 grammes ;

Une colonne d'eau du lac de mêmes dimensions pèserait 30 002 grammes.

Il n'y a pas lieu de s'occuper, dans les faits ordinaires, d'une différence aussi faible.

Variation de la densité de l'eau sous pression. L'eau est faiblement compressible. Elle diminue de volume et par conséquent sa densité augmente sous les fortes pressions. D'après les valeurs classiques de Grassi, le coefficient de compressibilité de l'eau pure est

à 0°	0.000 0503	par atmosphère
à 25°	0.000 0456	»

La température des couches profondes du lac, à + 5°, est plus approchée de 0° que de 25° ; le coefficient de compressibilité qui leur sera applicable sera donc à très peu près égal à 0.000 050 soit à 50 millionnièmes du volume pour chaque atmosphère.

D'après cela, si la densité d'une eau que nous prenons à la surface est 1.000 000

sous 10 atmosphères	elle sera	1.000 500
20	»	1.001 000
30	»	1.001 500

Il y a là une correction importante à apporter à la densité de l'eau lorsque nous la considérons in situ, dans le fond du lac. Indépendamment de toute question de température, la densité de l'eau augmente rapidement de la surface jusqu'au fond du lac, en raison de la compression qu'elle subit par le poids des couches superposées.

La densité de l'eau augmentant avec la pression, une atmosphère de pression sera représentée par une colonne d'eau plus courte au fond du lac qu'à la surface. Mais encore ici la différence est minime. Dans l'eau du lac Léman, il y a

1 atmosphère	de pression à la	profondeur de	10.328m
10 atmosphères	»	»	103.27
20 atmosphères	»	»	206.49
30 atmosphères	»	»	309.64

Autrement dit, la hauteur d'eau représentant une atmosphère est, dans le lac Léman,

à la surface, une colonne de		10.328^{m}
à 100^{m}	»	10.327
à 200^{m}	»	10.324
à 300^{m}	»	10.321

Le Léman ayant 309.7^{m} de profondeur maximale, la pression y est, dans la plaine centrale, exactement de 30 atmosphères, pour la pression de l'eau, à laquelle il faut ajouter la pression atmosphérique aérienne. Cela s'exprime par centimètre carré :

Pression de l'eau	30 990^{gr}
Pression de l'atmosphère	991
Ensemble	31 981

soit en gros 32 kilogrammes par centimètre carré.

Cette pression subit des variations tenant à deux causes ;

a Aux variations de la pression atmosphérique. Ces variations sont, dans nos contrées, d'après les observations de Genève (1), limitées à une valeur de 46^{mm} de mercure, soit 0.06 de la pression totale de l'atmosphère, soit à 62^{gr} par $^{cm^2}$.

b Aux variations de la profondeur de l'eau. L'amplitude moyenne de la variation annuelle était, dans le régime qui a pris fin en 1885, de 1.54^{m} (2). Une telle amplitude causait une variation de pression de 0.15 atmosphère ou de 159^{gr} par $^{cm^2}$. Avec le nouveau régime où la variation normale n'est plus que de 60^{cm}, la variation de pression est réduite de moitié et plus ; elle n'est plus que de 0.06 atmosphère ou de 62^{gr} par $^{cm^2}$. C'est la même valeur que celle qui résulte des variations de la pression atmosphérique.

II. **Surface sphéroïdale de la nappe d'eau.**

Si la terre était immobile et isolée dans l'espace, si encore elle était homogène et de densité régulière, sa forme serait une sphère parfaite, le centre de gravité étant au centre de figure de la sphère.

(1) *E. Plantamour.* Nouvelles études sur le climat de Genève. Genève, 1876.

(2) T. I., p. 495.

Mais la terre est soumise à l'attraction des astres ; de là les marées plus ou moins compliquées de ses diverses couches fluides. Laissons-les pour le moment de côté : nous y reviendrons.

Mais la terre est en rotation sur l'axe de ses pôles et la force centrifuge transforme la sphère en un sphéroïde de révolution. La forme sphéroïde est déterminée par la combinaison de deux forces opposées, la force centrifuge et l'attraction de la masse ; la surface idéale de la terre est, en chaque lieu, normale à la résultante de ces deux forces.

Le sphéroïde terrestre est aplati aux pôles ; la différence entre les deux diamètres est de 1 : 300e environ.

La forme idéale de la terre est représentée à la surface par la nappe des eaux dormantes, océans et lacs. Le Léman en est une partie.

Le lac Léman est de trop petites dimensions pour que nous ayons à tenir compte de la différence de courbure donnée par le faible aplatissement de 1 : 300 environ du diamètre polaire comparé aux diamètres équatoriaux (1). Le diamètre de la terre étant pour nos latitudes de 45° de 12 732^{km}, moyenne entre le diamètre polaire et le diamètre équatorial, la courbure de la surface est très approximativement celle d'une sphère de 6366^{km} de rayon.

Cette courbure est très sensible à l'œil. Le spectateur, placé au bord du lac, a son horizon borné par la rotondité de la terre ; les objets placés à une certaine distance lui sont cachés, s'ils sont au niveau de l'eau. Une barque qui navigue à quelques kilomètres de nous a son corps caché derrière la ligne de l'horizon ; nous ne voyons pas la grève des rives situées de l'autre côté du lac.

Pour l'étude des mirages, réfractions et réflexions à la surface du lac, nous aurons fréquemment à faire intervenir cette notion de la rotondité de la terre. Il est donc utile de donner ici les valeurs qui expriment d'une manière pratique cette courbure de la nappe du lac.

(1) La plus grande étendue du lac dans le sens du méridien est de 13.5^{km} entre le golfe de Perroy et celui de Coudrée. Si, pour nous rendre compte de l'importance de la différence de courbure, suivant que nous considérons deux grands cercles, l'un parallèle, l'autre perpendiculaire au méridien, nous calculons la hauteur de la tangente au-dessus de l'eau pour une longueur de 13.5^{km} dans le grand cercle d'une sphère de 6356455^{m} de rayon (diamètre polaire terrestre d'après Clarke) nous le trouvons de 14.29^{m} ; la même hauteur sur une sphère de 6378190^{m} de rayon (diamètre équatorial) serait de 14.33^{m}. La différence de 4^{cm} est insignifiante dans ces conditions qui dépassent de beaucoup celles de nos latitudes : à plus forte raison peut-elle être négligée dans les conditions réelles du lac.

Les questions qui se posent à nous sont le plus souvent les deux suivantes :

Quelle est, pour une hauteur donnée de l'œil du spectateur, la distance du cercle de l'horizon ?

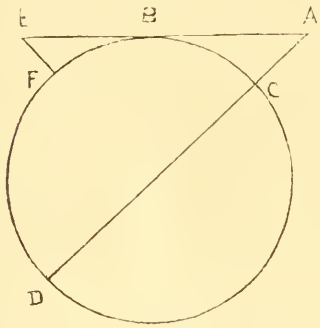
Quelle est, pour une hauteur donnée de l'œil, la hauteur d'une côte éloignée qui est masquée par la rotondité de la terre ?

Etudions-les successivement.

Le cercle de l'horizon.

On nomme cercle de l'horizon la distance où, en dehors de toute réfraction, la tangente partant de l'œil atteint la surface liquide; la grandeur de ce cercle dépend de la hauteur de l'œil au-dessus de la nappe d'eau.

Pour calculer le rayon de ce cercle, soit la longueur AB, fig. 43, nous utilisons le théorème connu : « la tangente est moyenne proportionnelle entre la sécante entière et sa partie extérieure. »



(Fig. 43.) Tangente et sécante extérieure.

$$AD : AB = AB : AC.$$

Dans la pratique AD peut ici être considérée comme égale à DC, le diamètre de la terre, $2r$.

$$AB = \sqrt{2r.AC}.$$

Si nous donnons au diamètre de la terre passant par notre latitude une valeur de 12 738km (1), nous avons pour diverses hauteurs de l'œil, le cercle de l'horizon aux distances suivantes :

Hauteur de l'œil. AC. (Partie extérieure de la sécante.)	Rayon du cercle de l'horizon. AB. (tangente.)
1m	3 569m
2	5 048
3	6 182
4	7 138
5	7 981

(1) La valeur du degré de latitude pour la position du Léman, 46° 27', est d'après les tables de Carrington, de 111 161m.

Hauteur de l'œil *AC*. (Partie extérieure de la sécante.)	Rayon du cercle de l'horizon. *AB*. (tangente.)
6m	8 742m
8	10 095
10	11 287
15	13 823
20	15 962
25	17 845
30	19 548
40	22 570
50	25 237
60	27 646
80	31 923
100	35 690
192	50 kilomètres.

D'après ce tableau, si étant au bord du lac, j'ai l'œil à 2m au-dessus de l'eau, le cercle de l'horizon passe à 5 kilomètres de moi ; si j'ai l'œil à 8 mètres, le cercle de l'horizon est à 10 kilomètres, et ainsi de suite. (1)

Les cas dans lesquels on a à faire intervenir cette distance du cercle de l'horizon pour une hauteur connue de l'œil, ou inversément, sont assez nombreux pour que je donne dans la figure 44 (page 8) un graphique permettant de déduire ces valeurs l'une de l'autre. Je me suis arrêté aux limites de 25m pour la sécante, (hauteur de l'œil au-dessus de la nappe d'eau) et de 18km pour la tangente (rayon du cercle de l'horizon.)

Les parties masquées par la courbure de la terre.

En dehors de toute réfraction atmosphérique, les objets situés au-delà du cercle de l'horizon et au-dessous du plan tangent à la nappe de l'eau sont masqués à l'œil de l'observateur. Cherchons à quelle hauteur passe cette tangente, pour apprécier la hauteur des objets masqués.

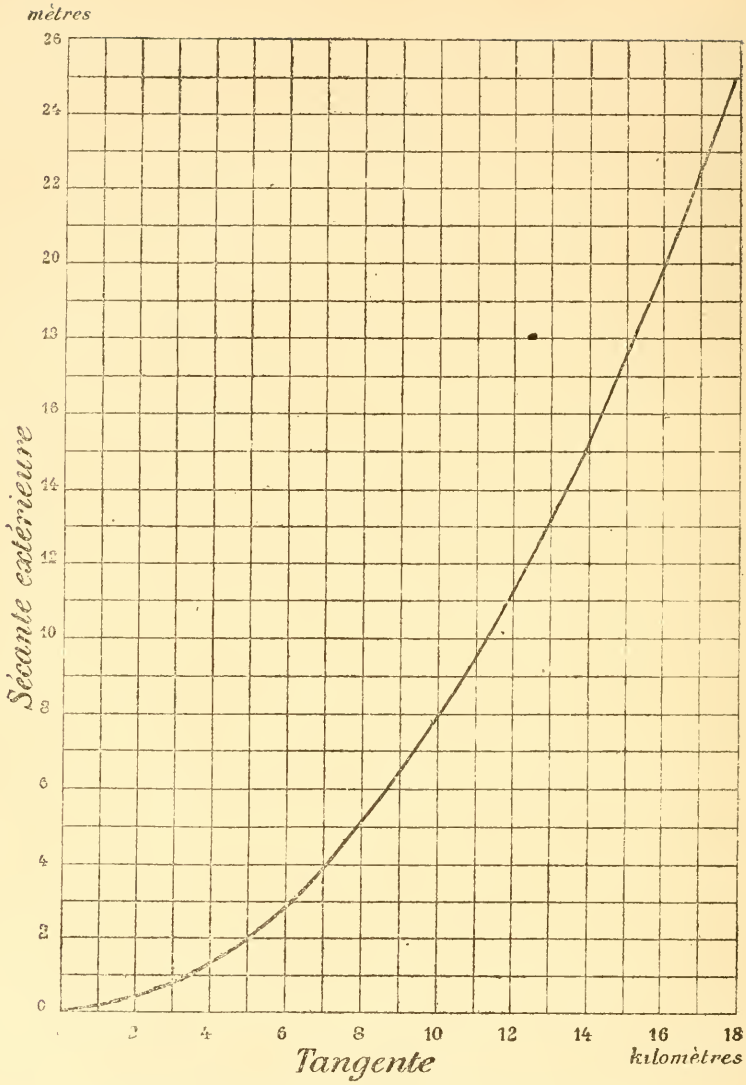
(1) M. le professeur Ch. Dufour, de Morges, m'indique une formule qui lui permet de trouver le rayon du cercle de l'horizon par un simple calcul de tête,

soit *AB* (rayon du cercle de l'horizon) exprimé en kilomètres.

AC (hauteur de l'œil sur l'eau) en décimètres ;

$$AB = \sqrt{AC + \frac{AC}{4}}$$

L'erreur commise par l'emploi de cette formule est inférieure au 1 %.



(Fig. 44.) Graphique des relations entre le cercle de l'horizon et la hauteur de l'œil du spectateur.

Le problème se décompose dans chaque cas en deux questions :

a. Chercher la distance du cercle de l'horizon ;

b. Chercher la hauteur de la partie extérieure de la sécante, à la distance qui existe entre le point considéré et le cercle de l'horizon.

La première question est déjà résolue. Occupons-nous ici de la seconde.

Quelle est la hauteur de la partie extérieure de la sécante, à une distance donnée du point de tangence ?

Le même théorème que nous avons utilisé nous apprend (voyez fig. 43) que

$$EF = \frac{EB^2}{2\,r.}$$

Autrement dit : la partie extérieure de la sécante est égale au carré de la tangente divisé par le diamètre du cercle, ici le diamètre de la terre.

De cette formule nous obtenons le tableau suivant qui nous donne, en seconde colonne, la hauteur à laquelle passe la tangente pour la distance marquée en première colonne.

Longueur de la tangente. (*EB.*)	Partie extérieure de la sécante. (*EF.*)
4^{km}	1.2^{m}
5	1.9
6	2.8
8	5.0
10	7.8
12	11.3
15	17.6
20	31.4
25	49.0
30	70.7

C'est-à-dire que si j'ai l'œil au niveau de l'eau, je ne vois plus, à la distance de 4^{km}, un objet qui n'a pas 1.2^{m} au-dessus de l'eau, à la distance de 30^{km}, un objet qui est à moins de 70.7^{m} au-dessus de la nappe du lac.

Cela étant établi, nous pouvons résoudre le problème dans son ensemble, et en nous reportant aux signes de la fig. 43, dire : J'ai l'œil à la hauteur AC au-dessus de l'eau ;

je cherche d'abord la distance AB, soit le rayon du cercle de l'horizon,

$$AB = \sqrt{2\,r.\,AC.}$$

Je cherche ensuite la distance EB entre l'objet considéré et le point de tangence du rayon visuel avec l'eau, autrement dit le cercle de l'horizon.

$$EB = AE - AB.$$

Je cherche enfin la hauteur de EF, partie extérieure de la sécante, pour la longueur EB de la tangente.

$$EF = \frac{EB^2}{2r}.$$

Quelques exemples montreront l'intérêt de ce problème. Je choisis, pour la distance AE, quelques valeurs applicables à notre lac :

10 kilomètres. Distance de Morges à Ouchy.
14 » » » à Evian, Lutry.
32 » » » à Montreux, Chillon, le Bouveret.
50 » » de Nyon à Clarens et de Promenthoux à Veytaux, la plus grande trajectoire directe possible sur le Léman.

Hauteur de l'œil. (*AC.*)	Cercle de l'horizon. (*AB.*)	Hauteur masquée (*EF.*) aux distances *AE*.			
		10km	14km	32km	50km
2m	5 048m	1.9m	6m	60m	159m
3	6 182	1.2	5	55	151
4	7 136	1.0	4	49	144

On voit par ces chiffres combien la hauteur masquée par la rotondité de la terre croît rapidement avec la distance. Quand j'ai, sur le quai de Morges, l'œil à 2m au-dessus du lac, je ne vois plus, à la distance d'Ouchy (10km), un homme debout dans un bateau, — à la distance d'Evian (14km), je ne vois plus le sommet des voiles d'une péniche, — à 32km, je ne vois plus ce qui est plus bas que le pont de Montreux, je ne vois pas en particulier le sommet des toits de Chillon, qui ne s'élèvent pas à plus de 46m au-dessus du lac.

Autre exemple : le toit de Chillon étant à 46m au-dessus du lac, la tangente qui en part passe à Morges à 4.8m au-dessus de l'eau ; tant que notre œil ne s'élève pas à cette hauteur, le coq du donjon de Chillon reste caché à nous autres Morgiens.

III. Des dénivellations.

J'appelle *dénivellation* toute altération du niveau de la nappe du lac. Quand, pour une cause quelconque, la surface du lac n'est plus parallèle à celle du sphéroïde terrestre, quand l'eau est plus élevée dans une station que dans une autre, il y a dénivellation.

Ces dénivellations sont les unes constantes, les autres temporaires.

Les *dénivellations constantes* sont celles qui existent toujours, sans interruption, ou bien celles qui ont lieu si souvent qu'elles caractérisent l'état normal et se retrouvent dans les moyennes d'observations de la hauteur du lac.

Nous aurons à distinguer les dénivellations constantes *de causes statiques*, celles qui résultent de l'attraction des côtes, et les dénivellations constantes *de causes dynamiques*, la pente du lac.

Les *dénivellations temporaires* durent peu, et, changeant fréquemment de sens et de direction, elles sont sans influence sur le niveau normal du lac; leur effet, très fort peut-être dans une observation isolée, disparaît si l'on s'adresse, pour les moyennes de hauteur, à un nombre suffisant d'observations.

Nous aurons à distinguer les dénivellations temporaires de causes *astronomiques*, les marées, et les dénivellations temporaires de causes *atmosphériques*, les seiches et les vagues.

IV. Dénivellations constantes de causes statiques.

Deux forces combinent leur résultante pour donner sa forme d'équilibre au sphéroïde terrestre et à la nappe liquide qui la représente à la surface de la terre [1]; l'attraction de la masse terrestre d'une part,

[1] La forme idéale de la terre serait figurée par la surface de la masse liquide de l'océan si celui-ci recouvrait tout le globe. Comme l'océan est interrompu par les continents, il faut supposer que ceux-ci seraient parcourus par un réseau de canaux en libre communication avec l'océan; la surface de cette nappe liquide représente la figure idéale de la terre.

la force centrifuge d'autre part, résultant de la rotation diurne sur l'axe des pôles.

Si la force centrifuge va régulièrement en progressant du pôle à l'équateur, l'attraction de la masse de la terre n'est pas partout égale et régulière; la résultante des forces attractives qui agissent sur les différents points de la surface ne coïncide pas toujours avec la normale à l'ellipsoïde de révolution de la terre. C'est ce fait que l'on exprime en disant que le fil à plomb est dévié en certaines localités.

L'attraction variant en raison directe des masses et inverse du carré des distances, il en résulte que les masses les plus rapprochées d'un point de la surface auront la plus grande influence sur ce point. Or ces masses peuvent varier considérablement et cela de la manière suivante :

a) La surface de la terre étant supposée égale et aplanie, il peut y avoir variation dans la densité des couches de la terre; depuis la densité des filons métalliques jusqu'à celles des lignites et des tourbes, il y a des différences énormes. A la limite de deux formations différentes, il est évident que le fil à plomb sera dévié vers la couche la plus dense.

b) Le cas le plus fréquent où se rencontre normalement cette différence dans la densité des masses est celui de la côte d'une mer ou d'un lac; d'un côté est la terre ferme avec ses roches pesantes, densité moyenne 2.6; de l'autre, l'eau douce ou salée, densité 1.0 ou 1.026. Il est évident que dans ce cas la déviation du fil à plomb sera d'autant plus considérable que le talus sous-marin ou sous-lacustre sera plus incliné, et que la profondeur de l'eau sera plus importante.

c) Les inégalités de relief de la terre ferme sont une cause plus puissante encore de déviation du fil à plomb, la différence de densité entre la roche et l'air atmosphérique étant plus grande qu'avec l'eau. Une montagne qui s'élève au milieu d'une plaine attire le fil à plomb tout autour de sa base; une vallée qui sillonne un plateau agit en sens inverse sur les flancs de son ravin.

Il résulte de tout cela que l'océan est loin d'avoir le même niveau sur toute sa surface; qu'il se relève sur les côtes des continents et des îles; qu'il se relève d'autant plus que la côte est plus élevée et plus montagneuse, que le fond de la mer descend suivant un talus plus incliné, que la mer enfin est plus profonde.

Quelle est l'importance de cette dénivellation; vaut-il la peine d'en

tenir compte? Le Dr J. Hann, de Vienne, dans un travail excellent (1), a évalué l'importance de ces inégalités de la figure de la terre : en s'appuyant soit sur le calcul direct, soit sur les variations de la pesanteur mesurées à l'aide du pendule, soit sur la déviation du fil à plomb, il a trouvé des chiffres qui s'élèvent à plusieurs centaines de mètres pour la différence entre le niveau de l'océan en pleine mer ou près des îles pélagiques, comme Ste-Hélène ou les Açores, et le niveau de l'océan sur les côtes des grands continents équatoriaux. Cette valeur énorme étonnera ceux qui n'ont pas encore réfléchi à cette action, mais elle n'est peut-être pas exagérée. D'autres auteurs cependant réduisent cette dénivellation à des quantités insignifiantes. L'accord n'est pas encore établi sur l'importance de la déformation du géoïde, ou sphéroïde terrestre, par l'action des différences d'attraction du sol, des montagnes et de la mer.

Ces mêmes circonstances agissent sur les bords de nos lacs, et cela avec d'autant plus d'intensité que, l'eau douce étant moins dense que l'eau salée, la différence entre la masse des terres et celle de l'eau est plus considérable. Nous devons donc admettre que la nappe de nos lacs forme des surfaces qui sont loin d'être planes.

1° Faisant partie du sphéroïde de révolution de la terre, la surface d'un lac est une portion de surface sphéroïdale.

2° Sur les bords, l'eau se relève par suite de l'attraction de la rive.

3° Ce relèvement des bords n'a pas partout la même intensité ; il a son maximum là où la rive est le plus abrupte, le talus du lac le plus incliné, le lac le plus profond. Dans le Léman, c'est sur la côte de la Savoie, de St-Gingolph à Evian, que cette dénivellation est à son maximum, puis vient la côte suisse d'Ouchy à Villeneuve, puis le reste des côtes du Grand-lac, puis enfin le Petit-lac.

Il y a déviation de parallélisme entre la nappe du lac et la surface idéale du sphéroïde terrestre ; certaines régions sont plus relevées que d'autres, il y a donc *dénivellation*. Les forces attractives qui déterminent cette dénivellation sont d'action constante et statique ; nous avons donc sur notre lac à reconnaître des *dénivellations constantes à causes statiques*.

(1) *Dr J. Hann*. Ueber gewisse beträchtliche Unregelmässigkeiten des Meeresniveau. Mittheil. der k. k. geographischen Gesellschaft in Wien. XVIII, p. 554. 31 déc. 1875. — Voir encore *S. Günther*. Lehrbuch der Geophysik, I, 191, sq. Stuttgart, 1884.

Quelle peut être la valeur et l'importance du relèvement de l'eau sur les rives du Léman ? Cela n'a pas été calculé d'une manière suffisante ; et cependant cela mériterait de l'être, car les données du problème sont très nettes et très simplement posées. C'est à provoquer ce calcul qu'est destiné ce paragraphe.

Voici, par exemple, les données du problème sur quelques points principaux du lac :

Au Dézaley, entre Cully et St-Saphorin, au milieu de La Vaux, le lac descend par un talus régulièrement incliné jusqu'à 270^m de profondeur à 1300^m de la côte ; la terre ferme s'élève en pente régulière jusqu'à 285^m au-dessus du lac, à 440^m de la rive. Les couches géologiques de la terre ferme sont connues ; ce sont des grès, des calcaires, des marnes, dont la densité moyenne peut être fixée à 2.7.

A Rivaz, un peu à l'est de la station précédente, le lac descend à 255^m de profondeur à une distance de 875^m de la rive ; la côte présente une hauteur de 240^m au-dessus du lac, à 950^m de distance du bord ; même densité que ci-dessus pour les couches terrestres.

A partir des points indiqués dans ces deux exemples, le fond du lac est parfaitement horizontal, et la terre ferme s'élève en un plateau relativement peu accidenté.

Au Locon, près de Meillerie en Savoie, le lac descend à une profondeur de 225^m à une distance de 450^m de la rive, et la côte s'élève assez régulièrement jusqu'au sommet de la Dent d'Oche, dominant de 1850^m la surface du Léman et distant de 6^{km} du bord du lac.

Un de mes amis a voulu tenter un premier calcul ; il a cherché quelle serait approximativement la déviation de la verticale sur la côte de Rivaz, au pied des monts de Chexbres en faisant intervenir uniquement l'action d'attraction du plateau du Jorat, sans s'occuper des attractions compliquées des massifs des Alpes et du Jura. Les chiffres auxquels il est arrivé sont de 3 à 5 secondes de degré. Rien ne nous indique jusqu'à quelle distance de la rive la dénivellation se prolonge ; si nous admettons, ce qui n'est guère probable, qu'elle étende son action jusqu'au milieu du lac, large en cette région de 8 kilomètres, un angle de 5 secondes pour un rayon de 4000^m représenterait environ 10^{cm} de hauteur. C'est donc à une valeur d'ordre très faible que nous avons affaire dans les conditions les plus favorables offertes sur les rives du Léman.

Mais s'il y a des différences dans le niveau de l'eau, des dénivella-

tions constantes, ces différences devraient, semble-t-il, être indiquées par les observations limnimétriques. Le nivellement fédéral, exécuté de 1865 à 1874 sur les rives du lac, donne avec une très grande précision [1] la hauteur de repères situés dans toutes les villes principales de la côte suisse ; grâce à ces repères on a pu déterminer l'équation des limnimètres que nous avons donnée [2]. Les limnimètres étant ainsi rapportés au même plan, les lectures faites à ces instruments devraient indiquer des différences de niveau entre les diverses stations, si ces différences existaient réellement.

Mais si nous ne trouvons pas de différence dans les lectures des divers limnimètres, en devons-nous conclure que les dénivellations statiques n'existent pas? En aucune façon.

En effet, les mêmes influences qui agissent en différentes places pour dévier plus ou moins le fil à plomb agissent aussi sur le niveau des géomètres pendant les opérations du nivellement : de station en station, le niveau du géomètre reste horizontal, c'est-à-dire perpendiculaire à la résultante des forces d'attraction, c'est-à-dire perpendiculaire au fil à plomb ; si celui-ci est dévié, le niveau est dévié aussi et subit une dénivellation. Le nivellement reste exact en apparence alors même que des dénivellations plus ou moins importantes ont lieu. C'est en plus petites proportions le fait que le nivellement général de la mer reste exact de l'équateur au pôle, alors même que le rayon de la terre aux différentes latitudes est fort inégal, alors même que la terre, au lieu d'être une sphère, est un sphéroïde de révolution ; c'est aussi le même fait qui empêche le nivellement géométrique le plus attentif de reconnaître la rotondité de la terre.

Mais si le nivellement du géomètre est impuissant à révéler ces dénivellations côtières, l'observation directe ne saurait-elle pas les rendre apparentes? Si la surface de l'eau se relève contre la rive, établissons-nous au bord du lac et visons un objet placé sur l'eau à quelque distance ; il devra paraître, non pas au-dessous du plan horizontal passant par la surface du lac, à nos pieds, mais au-dessus. On pourrait, semble-t-il, mesurer l'angle que fait la nappe du lac avec le fil à plomb.

[1] De Genève à Morges l'erreur possible est dans les limites de $\pm$ 2 millimètres. *A. Hirsch* et *E. Plantamour*. Nivellement de précision de la Suisse. I, p. 44. Genève. 1867.

[2] T. I, p. 456.

et en tenant compte de la hauteur de la station au-dessus de l'eau, en déduire la déviation de la verticale. Une telle observation donnerait des résultats parfaitement exacts s'il n'y avait pas, dans l'air en contact avec la surface de l'eau, des réfractions qui altèrent presque toujours la direction des rayons lumineux tangents au lac. Dans le chapitre où nous traiterons des réfractions aériennes, nous aurons à constater l'importance de ce phénomène et sa fréquence. Il semble impossible de rien tirer de ce genre d'observations pour la question qui nous occupe ici.

En résumé, j'admettrai l'existence de différences de niveau, dues aux causes constantes et persistantes de la déviation de la verticale, par suite de l'attraction inégale des couches inégalement denses de la surface de la terre; j'admettrai sur notre lac l'existence de *dénivellations constantes à causes statiques*. Le niveau de l'eau est plus distant du centre de la terre sur les bords qu'au milieu du lac ; ces dénivellations varient d'importance aux différents points de la côte ; ces dénivellations échappent à l'étude des procédés hypsométriques ordinaires. Elles sont probablement de valeur très petite et peuvent être négligées.

V. **Dénivellations constantes à causes dynamiques.**

Je désigne sous ce nom des dénivellations causées par des actions mécaniques, intervenant constamment, ou assez fréquemment pour que leur effet devienne normal et évident dans la comparaison des moyennes.

Leur origine n'étant pas due à l'attraction de la masse de la terre, cet effet de dénivellation ne se produit pas dans les opérations géodésiques du nivellement du pays; les dénivellations des masses d'eau dont nous parlons seront donc constatables par la comparaison d'observations faites à différents limnimètres convenablement repérés entre eux.

Il y a des différences dans le niveau moyen des différentes mers, et, sur la même mer, dans le niveau moyen des différents ports.

Ces différences sont très faibles, elles ne dépassent guère quelques centimètres, mais elles sont constatables. C'est ainsi qu'en utilisant les

nivellements de précision les plus récents, M. Ch. Lallemand a donné, en 1890, le tableau des hauteurs de la mer dans 28 stations côtières de l'Europe, rapportées au niveau moyen de Marseille [1]; les écarts les plus forts sont les suivants :

St-Jean de Luz,	Océan atlantique,	+ 25cm
Ostende,	Manche,	— 16
Travemünde,	Baltique,	— 9
Brouwershaven,	Mer du Nord,	— 8
Ancône,	Adriatique,	— 8

Toutes les autres stations ont un écart plus faible que 8 centimètres.

On peut attribuer ces différences locales dans le niveau moyen de la mer à des causes diverses agissant ou simultanément ou isolément :

1° Aux allures de la marée. Les différentes phases de la marée, marée montante, marée descendante, mer étale, sont assez variables d'un port à l'autre, suivant la configuration générale des côtes; tantôt c'est l'ascension de l'eau qui se fait le plus rapidement, tantôt c'est la descente; tantôt la courbe de la marée a des sommets aigus, tantôt des sommets mousses. Ces différences influent, on le comprend facilement, sur le niveau moyen de la mer et peuvent le modifier sensiblement.

2° A l'effet des courants qui accumulent l'eau à l'entrée de certains ports ou bien l'entraînent loin des côtes.

3° A l'effet de l'eau douce versée dans la mer par les fleuves. Par sa densité, plus faible que celle de l'eau salée, l'eau douce doit être en couches plus épaisses pour faire équilibre à la pression hydrostatique générale de la mer; là où l'eau de mer est diluée par une quantité notable d'eau douce, le niveau de la nappe liquide doit être plus relevé qu'ailleurs.

4° Inversement, à un excès de densité dû à une évaporation puissante qui concentre anormalement l'eau salée.

5° A la répétition fréquente des dénivellations accidentelles produites par le vent. Si le vent, comme nous allons bientôt le voir, peut être cause de dénivellations temporaires, si un vent déterminé souffle fréquemment, habituellement sur une côte, il y aura action sur la hauteur moyenne des eaux, et le niveau moyen en sera altéré.

[1] *Ch. Lallemand.* Le niveau des mers en Europe, etc. (extrait de la *Revue scientifique*). Paris, 1890.

6° Dans les lacs à émissaire, le courant qui transporte l'eau de l'embouchure des affluents à la sortie de l'effluent est une cause de dénivellation constante; nous allons l'étudier sous le nom de pente du lac.

Ces six causes de dénivellation peuvent-elles agir sur le niveau du Léman? C'est ce que je vais discuter rapidement.

1° La marée n'existe pas sur notre lac, comme nous le constaterons dans un paragraphe suivant; les variations de ses allures ne sauraient donc avoir une action de dénivellation.

2° Les courants existent dans les eaux du Léman, mais la constance et la régularité leur font absolument défaut; ils se dirigent tantôt dans un sens, tantôt dans un autre. Je ne connais aucune région du lac où il règne un courant constant. Il n'y a donc pas de possibilité d'attribuer aux courants du Léman aucun effet de dénivellation constante.

On doit même se demander si les courants peuvent réellement être cause de dénivellations. Ils sont causés eux-mêmes, le plus souvent, par des dénivellations, et ils ne peuvent pas être à la fois cause et effet. Cependant on peut concevoir un port ouvert en entonnoir et présentant son embouchure à un courant dont un bras, par sa force acquise, maintiendrait l'eau dans l'intérieur du port à un niveau plus élevé que dans le reste de la nappe liquide. Une action de cette nature demanderait, pour être sensible, l'intervention de courants bien plus puissants que ne le sont ceux de notre lac.

3° et 4° Les dénivellations dues à des différences de densité de l'eau semblent impossibles, l'eau du lac et celle de ses affluents étant l'une et l'autre de l'eau douce. Nous aurons, au chapitre de la thermique, à signaler de curieux faits de dénivellation des couches profondes, mais rien ne prouve que ces différences de niveau se manifestent à la surface du lac.

5° Les dénivellations temporaires dues à l'action des vents existent sans contestation, ainsi que nous allons l'étudier plus loin. S'il y avait prédominance d'un vent particulier du lac et une certaine constance dans sa direction et son action, on pourrait concevoir comment des dénivellations temporaires, se répétant souvent dans le même sens, pourraient agir sur la moyenne et causer des dénivellations du niveau normal du lac.

Mais les vents qui règnent sur le lac ne présentent en rien ce degré

de constance; c'est ce qu'une revue rapide de leurs caractères montrera facilement.

Les brises locales, qui seules sont un peu régulières, ne doivent absolument pas entrer en ligne de compte; qu'elles soufflent du lac sur la terre (rebat) ou de la terre sur le lac (morget), elles vont en s'irradiant du centre du lac vers les bords ou en sens contraire; elles ne peuvent donc pas avoir d'effet de dénivellation d'une côte à l'autre. (1)

Les vents d'orage descendent tumultueusement des montagnes avoisinantes (joran, bornan, molan, certaines vaudaires) et, frappant la surface du lac avec l'impétuosité que l'on sait, déterminent des dénivellations temporaires très fortes, dont j'ai de beaux exemples sur les tracés de mon enregistreur de Morges, et que j'étudierai plus loin, lorsque je rechercherai la cause des seiches. Mais les vents d'orage n'ont aucune constance et aucune régularité: leur effet ne peut donc pas se traduire sur les moyennes. (2)

Quant aux vents généraux, nous avons vu (3) que les deux vents principaux, la bise et le sudois, ont à peu près la même fréquence (42 et 44 jours par an, si je compte seulement les courants d'air d'intensité égale ou supérieure à 2); les autres vents généraux, vaudaire et joran, sont plus irréguliers et de moindre importance dans le régime anémométrique.

La direction des vents locaux et généraux est trop variable sur notre lac pour que les courants d'air puissent avoir une action de dénivellation constante.

6° La pente du lac existe, comme nous allons le voir, mais elle n'est pas assez forte pour être constatable par des observations limnimétriques, ailleurs qu'à la sortie du lac, à Genève.

En résumé, le raisonnement ne nous montre, en fait de dénivellations dynamiques possibles sur le Léman, que celle de la pente du lac; aucune des autres causes de dénivellation ne peut agir d'une manière constante.

Si ces conclusions sont exactes, nous devons trouver le lac de niveau sur ses différentes côtes, et des limnimètres bien repérés doivent

(1) T. I, p. 307.

(2) T. I, p. 327.

(3) T. I, p. 319 sq.

nous donner la même hauteur moyenne dans toutes les parties du Léman où la pente n'est pas encore sensible. Nous avons vu par l'histoire des limnimètres du Léman [1] combien leur repérage est chose compliquée et sujette à erreurs. Depuis que les nivellements de précision ont apporté une exactitude suffisante dans l'établissement de leur zéro, les différences de hauteur qui nous ont longtemps arrêtés et troublés disparaissent de plus en plus.

Au point de vue limnimétrique, le lac est de niveau sur toute son étendue, jusqu'au banc du Travers de Genève.

VI. Pente et courant du lac.

Théoriquement il doit exister une pente dans la nappe de surface du lac. Cela résulte du fait que le lac n'est pas autre chose qu'un fleuve élargi, que l'eau s'écoule de l'embouchure du Rhône valaisan à la sortie du Rhône genevois.

Quelle est l'importance de cet écoulement ? C'est ce qu'on peut calculer approximativement.

Considérons d'abord les valeurs moyennes. Nous savons que le débit moyen du Rhône de Genève est de $252^{m^3\ sec}$ [2]. C'est donc cette quantité qui en moyenne passe du Rhône du Valais et des affluents accessoires du Léman à Genève ; c'est cette quantité d'eau qui s'écoule dans les diverses sections du lac. Nous pouvons mesurer celles-ci sur la carte et en tirer la vitesse moyenne du courant. Pour éviter des fractions trop petites, j'indiquerai cette vitesse par minute.

Section.	Aire de la section.	Vitesse par minute.
Vevey-St Gingolph	$1\ 457\ 000^{m^2}$	0.010^m
Ouchy-Petite Rive	2 460 000	0.006
St Prex-Drance	1 475 000	0.010
Détroit de Promenthoux	135 000	0.112
Banc du Travers	7 600	1.989

D'après ces chiffres, le courant est très faible, et, sauf sur le banc du Travers, il doit être absolument imperceptible à l'œil au milieu des différents mouvements du lac.

(1) T. I, p. 456 sq.

(2) T. I, p. 445.

Mais ce courant, prodigieusement faible, doit être exagéré par deux circonstances : si le débit du Rhône de Genève est au-dessus de la moyenne d'une part, et si le lac est en crue d'autre part.

1° Tant que le lac reste stationnaire, qu'il ne s'élève ni ne s'abaisse, la quantité d'eau qui passe dans chacune de ces sections est égale à celle qui s'écoule par l'émissaire. Si donc le débit du Rhône de Genève est plus fort, le courant du lac en est d'autant exagéré.

Admettons que $600^{m3\ sec}$ soit le maximum de débit possible à Genève. La vitesse moyenne du courant que nous venons de donner pour les diverses sections devra être multipliée par 2.4 (600 : 252), et nous obtiendrons pour le courant du lac, en l'absence de crue, mais avec le débit maximal de l'émissaire :

Section de Vevey-St Gingolph	0.024^{m} par minute.
» d'Ouchy-Petite Rive	0.014
» St Prex-Drance	0.024
Détroit de Promenthoux	0.27
Banc du Travers	4.8

2° Si le lac est en crue, son volume d'eau augmente sur toute son étendue ; il faut donc qu'il y ait transport de l'eau sur toute la surface du lac depuis l'embouchure des affluents jusqu'à l'origine de l'émissaire, transport d'une quantité d'eau égale à la superficie du lac multipliée par la hauteur de la crue. Sur chaque section du lac, il doit donc y avoir un passage d'eau dont la valeur est représentée par la superficie de la partie du lac aval de la section, multipliée par la hauteur de la crue. A ce passage d'eau nécessaire pour satisfaire aux conditions de la crue, il y aura à ajouter la quantité d'eau dépensée par l'émissaire.

Faisons ce calcul pour les diverses sections du lac dans le cas de la crue la plus forte que nous connaissions, celle du 2 au 3 octobre 1888 (1) ; elle a donné une montée du lac de 238^{mm} en 24 heures, pendant qu'il y avait à Genève un débit moyen du Rhône de $100^{m3\ sec}$. J'arrive aux valeurs suivantes pour le courant dans les diverses sections du lac. (2)

(1) T. I, p. 534.

(2) Dans ce calcul, j'ai attribué aux affluents, qui se jettent en amont de la section Vevey-St Gingolph, toute l'eau versée dans le lac pour déterminer la crue ; cela n'a pas été le cas le 3 octobre, les affluents occidentaux ayant pris leur bonne part à la hausse du lac. Je me suis cru autorisé à arranger ainsi les données pour simplifier le calcul ; le courant auquel j'arrive est tellement lent, même dans cette supposition erronée, qu'il ne vaut pas la peine d'en rechercher la vitesse dans des circonstances moins favorables à sa production.

Section.	Superficie aval de la section.	Vitesse du courant par minute.
Vevey-St Gingolph	533$^{km^2}$	0.065^m
Ouchy-Petite Rive	373	0.027
St Prex-Drance	247	0.032
Détroit de Promenthoux	79	0.14
Banc du Travers	—	0.8

Si nous comparons les résultats obtenus par ces deux actions exagératives du courant, nous voyons que le grand débit de l'émissaire fait sentir son effet dans la partie occidentale et terminale du lac, — dans notre exemple sur les sections du banc du Travers et de Promenthoux — ; que, au contraire, l'effet d'exagération dû à une crue maximale est considérable dans la partie orientale du lac ; qu'il est sur le Léman sensible jusqu'à la section St Prex-la Drance.

Enfin, même en choisissant les cas où les circonstances sont le plus favorables, nous voyons que le courant propre du lac est insensible dans tout le Grand-lac ; un courant de 25, de 50 et même de 65^{mm} par minute, serait à peine constatable à l'œil dans un état de calme absolu du liquide ; il échappe certainement à l'observation, au milieu des mouvements bien plus considérables des vagues.

Mais dans le Petit-lac, il n'en est plus de même. La section diminue d'étendue ; la quantité d'eau qui s'écoule restant la même, le courant augmente de vitesse ; il atteint, dans nos exemples, au détroit de Promenthoux, 15 et 27^{cm} par minute, 2 et 4^{mm} par seconde ; il est d'autant plus fort, qu'en s'approchant de Genève, la section du lac diminue de largeur et de profondeur. Peut-être que des observations attentives et suffisamment subtiles arriveraient à le constater.

Sur le banc du Travers, le courant est parfaitement visible.

Ce courant se traduit-il par une pente de la surface ? Le plan limite de l'eau est-il incliné du Bouveret à Genève ? La question peut se poser.

Pour y répondre, supposons d'abord la masse de l'eau à l'abri de tous les mouvements intestins qui déplacent les différentes parties sous l'action des forces extérieures ; supposons-la protégée contre les vents, la chaleur, les variations de la pression atmosphérique ; supposons le lac dépourvu de vagues, de seiches, de courants. Un lac en vase clos aurait une pente. En effet, l'eau n'est pas parfaitement fluide ; ses molécules frottent les unes sur les autres, et frottent contre les

parois du bassin ; quelque faible que soit ce frottement, il les empêche d'obéir immédiatement aux actions d'attraction. Devant l'embouchure de chaque affluent, il doit y avoir formation d'un demi cône convexe, prodigieusement surbaissé, qui rejoint la nappe horizontale par une pente décroissante jusqu'à zéro ; en amont de l'origine de l'émissaire, il doit de même s'établir un demi entonnoir concave, également très peu déprimé. Les pentes superficielles de ces deux surfaces coniques doivent être variables, d'autant plus fortes que les affluents amènent plus d'eau, que l'émissaire en emmène davantage. Théoriquement, on pourrait admettre que ces deux surfaces coniques inverses, celle du Rhône du Valais, le seul affluent considérable du lac, et celle du Rhône de Genève, se joindraient quelque part dans la longueur du lac, et qu'il y aurait ainsi une pente suivant l'axe longitudinal du Léman. Mais si nous laissons intervenir les mouvements locaux de l'eau, si nombreux et si fréquents, nous voyons que cette pente doit être égale à zéro. Les vents charrient l'eau tantôt vers une rive, tantôt vers l'autre, par des courants superficiels : les seiches surtout font balancer l'eau des deux côtés de l'axe transversal du lac, et tendent sans cesse, par leur mouvement pendulaire, à ramener au plan horizontal la nappe d'eau, si elle avait été déviée de cette horizontalité. Il paraît impossible que la pente du lac résiste à cette nivellation par les mouvements partiels, locaux ou généraux de l'eau ; l'on doit considérer le lac comme une nappe parfaitement horizontale, ou plus exactement comme une nappe d'eau non déviée de l'horizontalité par la pente d'écoulement du fleuve qui la traverse.

Ces raisonnements théoriques sont confirmés par l'expérience.

Depuis l'été de 1877, M. Ph. Plantamour a eu l'obligeance de me communiquer les tracés de son limnimètre enregistreur de Sécheron, et j'en ai fait une comparaison attentive avec les tracés de mon appareil de Morges. Pendant 5 ans, cette comparaison a été poursuivie, et je ne suis pas arrivé à déterminer de différence de niveau entre les deux stations. Nos deux appareils ont leur zéro rapporté au repère fédéral le plus voisin, leur équation est égale à zéro, et comme l'on peut apprécier à un millimètre près la hauteur relative du lac à l'aide de ces excellents enregistreurs, il semble très facile d'en déduire la pente du lac.

Mais je n'y suis pas arrivé. Les dénivellations temporaires que nous étudierons plus loin ont une très grande importance et font varier

d'une telle manière le niveau local du lac, que la moyenne réelle de hauteur est fort difficile à apprécier.

Si la pente du lac avait existé, je l'aurais reconnue par une différence systématique entre les séries d'observations de l'été et celles de l'hiver. Au printemps, avec le fort débit du Rhône du Valais et la crue progressive du lac, la pente du Grand-lac aurait été exagérée ; en automne, avec le grand débit du Rhône de Genève et la décrue générale du lac, la pente aurait dû être à son maximum dans le Petit-lac ; en hiver, au contraire, les actions de dénivellation étant réduites à des valeurs très faibles, la pente aurait dû être à peu près nulle. Il y aurait donc eu des différences notables de régime dans les comparaisons faites entre nos deux limnographes, suivant les saisons. Je n'en ai pas reconnu trace.

Il est vrai que E. Plantamour, en comparant les moyennes mensuelles de Vevey et de Sécheron dans les années 1874 à 1880, a trouvé une pente :

aux basses eaux, hauteur du lac ZL + 1.14^{m}, pente de 1.7^{mm}
aux hautes eaux, » + 2.36 » 5.4

M. J. Epper, ingénieur au bureau des travaux publics de la Confédération, a fait une comparaison des moyennes limnimétriques mensuelles de Chillon et de Sécheron pendant 56 mois, de janvier 1885 à décembre 1889. La différence qu'il a trouvée entre ces deux stations n'est que de 4^{mm}, l'eau étant plus élevée à Chillon qu'à Genève. (1)

Il résulte de ces diverses recherches et comparaisons que la pente du lac est très faible, et qu'elle ne dépasse pas un centimètre entre le Grand-lac, qui peut être considéré comme étant de niveau, et l'extrémité du Petit-lac à Sécheron, à l'entrée du banc du Travers.

Quant à la pente de la sortie du lac, à Genève, en aval du banc du Travers, et spécialement à partir des entrées du port, nous en avons suffisamment parlé dans notre chapitre de la limnimétrie (2). Nous n'avons pas à y revenir.

(1) Observations hydrométriques suisses. Tables de récapitulation de l'année 1889, p. 37. Berne.

(2) T. I, p. 415 sq.

VII. **Dénivellations temporaires.**

Dans les paragraphes précédents, j'ai traité des dénivellations qui maintiennent d'une manière constante la hauteur du lac plus ou moins élevée sur telle rive que sur telle autre. J'arrive aux dénivellations temporaires par lesquelles le niveau moyen, altéré déjà par les causes constantes, est, accidentellement et pendant un temps limité, dévié de son état d'équilibre.

D'après leur origine je les divise en deux groupes, suivant que leurs causes déterminantes sont astronomiques ou atmosphériques.

VIII. **Dénivellations temporaires à causes astronomiques. Marées.**

L'attraction des astres détermine sur l'océan les dénivellations temporaires semi-journalières, connues sous le nom de marées.

Existe-t-il des marées sur notre lac ? La question peut se poser. En effet, si théoriquement les marées n'ont lieu que dans une masse d'eau illimitée recouvrant sans interruption la surface d'un globe, cependant on en a constaté dans des bassins d'eau qui, sans relations largement ouvertes avec l'océan, occupent une fraction relativement bien peu considérable de la surface du monde.

Ainsi la Méditerranée a incontestablement des marées et leur amplitude peut même être assez forte; elles atteignent, aux grandes marées de syzygie à Livourne, 30^{cm}, à Venise 60 à 90 ^{cm}, au fond du golfe de la Grande Syrte jusqu'à 2^{m}. [1]

« Le lac Michigan, » dit Reclus, « est la plus petite nappe lacustre où l'on ait constaté avec précision le retour régulier du flux et du reflux; l'amplitude de la marée y est, d'après le lieutenant Graham,

[1] *E. Reclus.* La Terre. Paris 1862, II, p. 147

de 75mm (1). » Or le lac Michigan, quoique mesurant environ 600km de longueur du nord au sud, n'en a guère que 150 dans son diamètre transversal de l'est à l'ouest, devant Milwaukee. Il est vrai que si l'on prend son point le plus occidental au sud, et son point le plus oriental au nord, on arrive à une différence de longitude de près de 3 degrés. Pour le Léman, dont la plus grande longueur de l'est à l'ouest est de 72.3km (en ligne courbe), la différence de longitude des deux extrémités n'est que de 47 minutes (2). La latitude de notre lac et celle du grand lac américain étant à peu près les mêmes, nous pouvons facilement établir une comparaison entre ces deux dimensions et voir que le lac Michigan a une longueur de longitude quatre fois plus forte que le lac Léman. Or, si les marées du Michigan atteignent 75mm, pourquoi n'en aurions-nous pas sur notre lac, plus faibles il est vrai, mais encore observables ?

J'ai dans les tracés de mon limnimètre enregistreur de Morges des documents qui me permettent d'apprécier de moment en moment avec une exactitude minutieuse la hauteur du lac; je puis en faire des lectures comparatives avec une précision d'un millimètre au moins. S'il y a une marée semi-journalière sur le lac, pourquoi ne pourrais-je pas la reconnaître ?

J'ai essayé de faire cette étude de trois manières différentes.

1° J'ai choisi une trentaine de jours à des époques quelconques de l'année, en cherchant les jours où le lac était le plus calme au point de vue des variations de hauteur, des seiches et des vibrations, où je pouvais par conséquent mesurer avec le plus de certitude la hauteur exacte du lac; j'ai ensuite compté comme commencement de la journée l'heure du passage de la lune au méridien, et, d'heure en heure de cette journée lunaire, j'ai mesuré la hauteur du lac. J'ai ensuite réuni les observations de ces trente jours et j'ai additionné ensemble les chiffres représentant la hauteur du lac de la première heure lunaire, de la seconde heure, etc., des divers jours d'observation. J'ai ainsi obtenu une série de hauteurs correspondant aux différentes heures lunaires. Dans la courbe représentant cette série, il m'a été impossible de reconnaître deux périodes de maximums et deux périodes de mi-

(1) *S. Günther* (Geophysik II, 384) met en doute la réalité des marées du lac Michigan, et attribuerait volontiers les dénivellations observées à des seiches.

(2) T. I, p. 16.

nimums, séparées les unes des autres par des espaces de 6 et 12 heures.

Il est vrai qu'en opérant ainsi je n'ai pas tenu compte de l'influence du soleil qui, suivant sa position par rapport à la lune, fait tantôt avancer, tantôt reculer l'heure de la haute mer par rapport à l'heure du passage de la lune au méridien; en choisissant des jours quelconques, j'espérais que les erreurs de cette nature, étant probablement tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, s'annuleraient réciproquement.

2° J'ai essayé de m'affranchir de cette cause d'erreur de la manière suivante. J'ai choisi, parmi les jours où la régularité des tracés était suffisante, les jours de syzygie; dans ces jours-là la différence de position du soleil et de la lune est trop peu importante pour faire varier considérablement l'heure de la haute mer par rapport à la première heure lunaire. J'ai répété sur 25 jours d'époque de syzygie, des mois d'avril à septembre 1876, les mesures que je viens de décrire, et voici les chiffres moyens que j'en ai tirés, rapportés à un niveau quelconque, pour les différentes heures de la journée lunaire :

Heure	mm.	Heure	mm.
1	13.0	13	13.2
2	12.9	14	13.0
3	12.8	15	13.2
4	13.2	16	13.0
5	13.0	17	13.1
6	13.0	18	13.4
7	12.7	19	13.6
8	13.0	20	13.9
9	13.0	21	14.0
10	13.0	22	13.8
11	13.2	23	13.8
12	13.2	24	13.6

Il y a là des différences d'une heure à l'autre qui se seraient égalisées par une suite plus nombreuse d'observations, mais je ne puis y reconnaître les maximums et minimums d'une marée.

3° J'ai répété cette tentative sous une troisième forme. J'ai profité d'une série de sept jours, du 10 au 16 décembre 1876, admirable par le repos complet du lac, série de jours pendant lesquels la hauteur du

lac n'a varié que de 11mm au maximum et est revenue au bout de la période à un millimètre près à ce qu'elle était au commencement; j'ai calculé pour chaque jour le moment de la marée haute, étant donnée la position relative des astres, et j'ai mesuré, comme ci-dessus, la hauteur du lac aux différentes heures de la journée de marée. Par ce procédé, pas plus que par les deux autres, je ne suis arrivé à trouver la courbe à deux maximums et à deux minimums d'une marée.

Je conclus donc qu'il n'y a pas moyen de reconnaître par les observations limnographiques de Morges l'existence d'une marée sur le lac Léman. Il est vrai que la station de Morges est mal placée au point de vue de ces études; située au milieu de la longueur du lac, toutes les actions qui font osciller l'eau dans le sens de l'est à l'ouest y sont à leur minimum d'amplitude. Il serait possible que des mesures exactes faites à Chillon ou à Genève donnassent, au point de vue des marées du lac, des résultats plus positifs que ceux que j'ai obtenus à Morges.

Grâce à l'obligeance de M. Ph. Plantamour, j'ai eu à ma disposition, pour cette étude, les tracés limnographiques de Sécheron de l'année 1891, et je les ai dépouillés avec soin. J'ai pris, pour chaque époque de syzygie, les trois journées les plus rapprochées de la conjonction ou de l'opposition luni-solaire, le jour même de la nouvelle ou de la pleine lune, le jour avant et le jour après; cela m'a donné, pour l'année, 76 journées utilisables; j'y ai mesuré de deux en deux heures du jour lunaire la hauteur du lac à Genève, et en la rapportant à un niveau quelconque, j'ai obtenu les hauteurs moyennes, la première heure étant le passage de la lune au méridien supérieur, vers l'heure de minuit.

1re heure,	hauteur moyenne du lac,		72.6mm
3e	»	»	72.9
5e	»	»	72.6
7e	»	»	72.7
9e	»	»	72.1
11e	»	»	73.1
13e	»	»	75.0
15e	»	»	75.8
17e	»	»	75.4
19e	»	»	73.8
21e	»	»	72.9
23e	»	»	72.6

Il n'y a pas là trace d'un double maximum et d'un double minimum journaliers; il n'y a donc, pas plus à Genève qu'à Morges, pas plus dans la région terminale occidentale du lac que dans sa région centrale, d'indices d'une marée luni-solaire.

S'il y en a une, elle est masquée par les dénivellations irrégulières, bien plus importantes, que nous allons étudier dans les paragraphes suivants; s'il y en a une, elle n'atteint pas à Morges un millimètre d'amplitude, à Genève, deux ou trois millimètres. (1)

IX. **Dénivellations temporaires à causes atmosphériques.**

Le niveau de l'eau d'un lac peut être troublé par une cause accidentelle temporaire provenant d'actions atmosphériques, et cela de deux manières.

Ou bien la dénivellation aura une certaine durée, une heure, un jour, elle sera soutenue, continue; l'eau s'élèvera progressivement à l'une des extrémités du lac; elle restera relevée tant que l'action continue la soutiendra, puis, l'action perturbatrice cessant, l'horizontalité primitive se rétablira, lentement et progressivement. Je désignerai ce phénomène sous l'appellation de dénivellations continues.

Ou bien la dénivellation sera un mouvement d'oscillation fixe, un mouvement de balancement de l'eau, laquelle s'élève alternativement à chaque extrémité pour redescendre ensuite. Ce sont des dénivellations rythmiques, connues sous la dénomination de seiches.

X. **Dénivellations continues.**

Le 12 juillet 1876, je faisais au limnimètre enregistreur de Morges les lectures suivantes :

8 heures du matin	. . . .	2.599^{m}
9 »	. . . .	2.604

(1) Les mesures faites sur les tracés de Genève ont moins de précision que celles de Morges, vu l'importance beaucoup plus grande des seiches dans la première de ces stations.

10 heures du matin 2.615
11 » 2.619

En trois heures de temps, le lac s'était élevé, à Morges, d'une hauteur de 20^{mm}. Cette crue était-elle générale, était-elle locale? était-ce, en employant les termes que j'ai définis, une variation de hauteur ou bien une dénivellation?

Etant donnée la surface du lac de 582.4^{km^2}, une crue de 20^{mm} répartie sur l'ensemble du lac représenterait un excès de l'entrée sur la sortie de 11 ½ millions de mètres cubes; cette crue ayant duré trois heures, cela signifierait un excès de l'entrée sur la sortie de $1070^{m^3\ sec}$. D'après la hauteur du lac (1), le débit du Rhône de Genève devait être, ce jour-là, d'environ $550^{m^3\ sec}$. Il y aurait donc eu, dans la supposition d'une variation de hauteur de 20^{mm} en trois heures, un débit des affluents de $1620^{m^3\ sec}$. Or le débit moyen du Rhône du Valais, en été, étant de 400 à $500^{m^3\ sec}$ (2), il y aurait eu, ce jour-là, un excédent de $1100^{m^3\ sec}$; le Rhône des hautes eaux aurait été plus que doublé. Y avait-il eu débâcle en Valais expliquant cette crue subite? Sur ma demande, M. le Dr Suchard, de Lavey, résuma comme suit l'état du Rhône : « Il y avait eu deux fortes crues, le 9 et le 10 juillet; mais, depuis lors, on remarquait une baisse constante du fleuve. » Quant aux affluents du lac autres que le Rhône, leur débit n'avait rien d'exceptionnel.

La crue du lac ne pouvant s'expliquer par un débit extraordinaire des affluents, pouvait-on en rendre compte par un arrêt de l'émissaire de Genève? Mais un excès de $1070^{m^3\ sec}$ de l'entrée sur la sortie n'aurait pu être causé même par l'occlusion complète du Rhône, ce fleuve ne pouvant, vu la hauteur des eaux, débiter plus de $550^{m^3\ sec}$.

Il n'y avait donc pas moyen de supposer une crue générale du lac, une variation de hauteur; la hausse du lac était locale, c'était une dénivellation.

Deux jours après, le 14 juillet, nous avons eu à Morges la dénivellation en sens inverse : de 1 h. 20 à 3 h. 15 soir, soit en 115 minutes, le lac a passé de la cote 2.605^m à la cote 2.593^m; il y a donc eu une baisse de 12^{mm}. Si cette baisse avait été une décrue générale du lac, elle aurait représenté un excès de la sortie sur l'entrée de près de 7 millions de mètres cubes et reportée sur 115 minutes, cela corres-

(1) T. I, p. 440.

(2) T. I, p. 360.

pondrait à un excès du débit de l'émissaire de $1000^{m3\ sec}$. Or le débit du Rhône de Genève n'était, ce jour-là, que de $550^{m3\ sec}$. Etant donnée la hauteur du lac, ce débit ne peut être modifié ni en plus ni en moins ; même à supposer l'arrêt subit et complet de tous les affluents du lac, nous ne saurions donc admettre la possibilité d'un excès de $1000^{m3\ sec}$ dans le débit de l'émissaire. Nous ne pouvons donc admettre que la baisse du 14 juillet fût une décrue générale du lac ; c'était donc une baisse locale, une dénivellation.

Nous avons, dans ces deux exemples, affaire à des dénivellations ; elles sont temporaires, car elles apparaissent à un moment donné et disparaissent quand l'action déterminante a cessé ; elles ne sont pas rythmiques et n'ont aucun rapport avec les seiches.

Si nous étudions les observations limnimétriques faites simultanément à deux stations différentes du lac, comme Vevey et Genève, ou Morges et Genève, nous y trouvons un défaut de parallélisme très évident, qui montre l'existence de dénivellations locales. Ces différences de marche sont très sensibles si l'on compare les observations de deux limnimètres à flotteur ; j'ai fait d'abord cette étude pour tous les jours des années 1871 à 1875, de Vevey à Genève, en faisant abstraction de la pente de la sortie du lac, variable avec les saisons ; j'ai trouvé que la différence de hauteur de l'eau variait avec la direction des vents ; j'ai estimé de 12 à 15^{cm} l'amplitude de ces dénivellations.

Je les ai ensuite retrouvées avec plus de certitude en faisant, en 1876, la comparaison de la hauteur du lac mesurée à Morges avec mon limnimètre enregistreur, et celle du lac dans le port de Genève, mesurée par le limnimètre à flotteur du Jardin anglais. En apportant la correction de la pente de la sortie du lac, j'ai constaté des différences de hauteur, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, pouvant atteindre un maximum de 10^{cm}. [1]

Je les ai enfin étudiées avec la plus grande précision quand j'ai eu à ma disposition, grâce à l'obligeance de M. Ph. Plantamour, les tracés du limnographe de Sécheron, que j'ai pu comparer avec ceux de Morges.

Je donnerai un exemple de ces variations dans le tableau suivant qui indique pour trois mois de l'année 1877, août, septembre et décembre, la différence de hauteur entre les deux stations ; le signe + indique que la pente est dans le sens normal, que l'eau est plus haute

[1] *F.-A. Forel.* Bull. S. V. S. N. XV 148. Contributions à la limnimétrie du Léman. § XIII. Lausanne, 1878.

à Morges qu'à Sécheron ; le signe —, que la pente est renversée, l'eau étant plus haute à Sécheron qu'à Morges. En même temps, j'indique pour chaque jour la direction et la force du vent, d'après mes notes personnelles, et d'après les observations de Genève. La lettre V signifie variable et correspond généralement à l'existence de brises locales.

1877	AOUT		SEPTEMBRE		DÉCEMBRE	
	Vent	*Pente* mm	*Vent*	*Pente* mm	*Vent*	*Pente* mm
1	S.-S.-W.2	+ 17	V.	— 5	S.-W. 1	+ 7
2	V.	0	V.	— 5	N.-N.-E. 2	— 6
3	V.	— 1	S.-S.-W.2	+ 26	N.-E. 2	— 12
4	V.	— 19	V.	— 2	V.	— 1
5	V.	— 13	V.	+ 7	V.	— 4
6	V.	— 9	V.	— 14	V.	+ 5
7	V.	— 3	V.	+ 8	V.	0
8	V.	— 2	V.	+ 17	S.-W. 2	+ 6
9	S.-.W. 2	+ 4	V.	—	N.-E. 3	— 13
10	V.	+ 5	V.	—	V.	+ 1
11	V.	— 4	V.	+ 3	V.	+ 2
12	V.	— 5	V.	— 2	V.	+ 3
13	V.	— 5	V.	— 4	V.	+ 5
14	V.	— 3	V.	+ 5	V.	+ 1
15	V.	+ 16	V.	+ 1	N.-E. 2	— 26
16	V.	— 12	N.-N.-E. 3	— 8	V.	0
17	V.	+ 1	N.-E. 3	— 32	V.	— 1
18	V.	+ 7	N.-E. 2	— 34	V.	0
19	V.	— 9	N. 1	— 16	N.-N.-E. 3	— 9
20	V.	— 7	V.	+ 10	N.-N.-E. 4	— 91
21	V.	+ 10	V.	+ 11	N.-N.-E. 2	— 22
22	V.	+ 6	N. 1	— 9	N.-N.-E. 2	— 6
23	V.	+ 4	N.-E. 2	— 24	V.	+ 1
24	V.	— 9	V.	— 7	S.-W. 2	+ 7
25	V.	— 9	V.	0	S.-W. 2	+ 4
26	S.-S.-W.2	+ 25	N.-E. 2	— 22	S.-W. 2	+ 20
27	V.	+ 17	N.-E. 2	— 13	S.-W. 3	+ 11
28	V.	— 14	N.-E. 2	— 15	V.	+ 3
29	V.	+ 1	V.	+ 2	S.-W. 2	+ 5
30	V.	+ 4	V.	0	V.	0
31	V.	+ 5			V.	+ 2

D'après ces notes, quand le vent était variable, qu'il ne soufflait que des brises locales, la pente du lac était tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre.

7 fois la pente a été égale à zéro.
29 » » positive, inclinée de Morges à Genève.
26 » » négative, inclinée de Genève à Morges.

La somme algébrique des différences de pente de ces jours à vents variables arrive à une valeur égale à zéro, (— 0.1^{mm}), la pente étant nulle ou inappréciable de Morges à Genève.

Pendant ces 3 mois, un vent sudois plus ou moins fort a régné pendant 11 jours; dans ces cas la pente a toujours été positive, l'eau étant inclinée de Morges à Genève.

17 jours durant, une bise, vent du N. et N.-E., a régné avec plus ou moins d'intensité; pendant ces 17 jours, la pente a toujours été négative, l'eau étant plus élevée à Genève qu'à Morges.

La différence entre la plus forte pente positive		+ 26^{mm}
et la plus forte pente négative		— 91
	soit	117^{mm}

donne une valeur de 12^{cm} environ pour les dénivellations extrêmes entre les stations de Morges et de Genève.

Pour mieux nous rendre compte des allures de ces dénivellations, je vais étudier plus en détail un cas spécial.

Je prendrai pour exemple la violente bise qui a commencé à souffler dans l'après-midi du 19 décembre 1877; je l'analyserai heure par heure [1] en donnant dans le tableau suivant la hauteur du lac à Morges, la pente du lac de Morges à Sécheron, et l'intensité de la bise, V, appréciée d'après les vibrations dessinées sur le tracé de l'enregistreur de Sécheron [2]; la pente a, pendant toute cette série, été négative, c'est-à-dire que l'eau était plus haute à Genève qu'à Morges.

Cet exemple offre une très bonne idée des allures des dénivellations continues du lac. Il montre les eaux s'élevant assez régulièrement à Genève sous l'influence de l'augmentation d'intensité de la bise : du 19 décembre à 12 h. au 20 à 8 h., soit en 20 heures, le lac s'est élevé dans cette station de 80^{mm}, soit en moyenne de 4^{mm} par

[1] J'indique les heures d'une journée de 24 heures, commençant à minuit.

[2] Ces variations d'intensité de la bise sont confirmées par les notes de M. Ch. Dufour, à Morges.

heure. Pendant ce temps l'eau s'abaissait à Morges, mais de 36mm seulement, un peu moins de 2mm par heure. La dénivellation est ainsi beaucoup plus intense, de plus du double, au fond du golfe long et étroit de Genève, qu'à Morges, où le lac a sa plus grande largeur.

DATE	Heure	Hauteur du lac à Morges	PENTE	V	DATE	Heure	Hauteur du lac à Morges	PENTE	V
1877		m	mm				m	mm	
19 déc.	12	1.412	— 9	1/2	20 déc.	8	1.376	— 125	4
	13	11	— 11			9	77	— 120	
	14	08	— 19			10	80	— 107	
	15	06	— 23			11	87	— 94	
	16	04	— 31	1		12	89	— 91	
	17	03	— 34			13	88	— 83	
	18	08	— 24			14	88	— 67	
	19	06	— 23			15	89	— 58	
	20	00	— 33			16	89	— 53	3
	21	1.397	— 45	2		17	91	— 48	
	22	1.403	— 46			18	92	— 37	
	23	1.397	— 50			19	91	— 30	
20 déc.	0	95	— 56	3		20	91	— 25	2
	1	94	— 55			21	91	— 26	
	2	86	— 69			22	89	— 26	
	3	83	— 80			23	89	— 24	
	4	86	— 84		21 déc.	0	89	— 23	
	5	86	— 87			1	89	— 25	1
	6	83	— 100			2	88	— 26	
	7	81	— 116	4		3	88	— 25	

Au moment où la dénivellation est à son maximum, 20 décembre, à 8 heures, la différence de niveau entre les deux stations est de 125mm. C'est la plus forte dénivellation que j'aie constatée par des observations de détail.

A partir du moment du maximum, la dénivellation diminue rapidement d'intensité, pour arriver le 20 décembre à 20 h., à un état à peu près stationnaire, où la pente est de — 25mm seulement. A ce moment, la bise était retombée à une intensité modérée.

En résumé, d'après toutes ces observations, je constate que les dénivellations temporaires continues sur le lac Léman ont lieu sous l'influence des vents; l'eau s'abaisse dans la région d'où vient le vent, côte sur le vent; elle s'élève dans la région vers laquelle il souffle, côte sous le vent.

Cette surélévation des eaux vers la rive sous le vent n'est-elle pas une illusion ? N'est-elle pas une erreur d'observation due aux appareils limnimétriques ? Cette question peut fort bien se poser. Voici en effet une remarque qui autorise ce doute.

Lorsque les vagues viennent frapper la rive, elles rejettent sur la grève des masses d'eau à une assez forte hauteur au-dessus du niveau moyen du lac, et une bonne partie de cette eau pénètre dans le sable et s'infiltre jusqu'à la nappe d'eau souterraine. Cette eau relève la nappe souterraine jusqu'à ce que sa hauteur détermine un courant assez fort pour rejeter au lac une quantité d'eau égale à celle qui est rapportée par les vagues. Ce relèvement peut parfois être considérable; je l'ai vu s'élever, dans quelques cas où j'ai pu le mesurer, jusqu'à plusieurs centimètres.

Ce relèvement de l'eau dans le sol sableux peut être très facilement mis en évidence par l'expérience suivante. Par un jour de vagues venant du large frapper à la côte, creusez dans le sable, à quelques mètres du lac, un bassin qui atteigne la nappe d'eau, joignez-le au lac par un siphon de caoutchouc interrompu sur une partie de son trajet par un tube de verre; le siphon une fois amorcé montrera un courant continu allant de la grève au lac, aussi longtemps que dureront les vagues.

Chacun, du reste, a pu observer au bord du lac les petites mares alimentées par les vagues et dont le niveau reste très supérieur à celui du lac, tant que les vagues viennent déferler sur la côte.

Ne pourrait-il pas en être de même dans nos limnographes ? L'eau ne pourrait-elle pas, par l'action des vagues, être relevée, non seulement au-dessus de la nappe générale du lac, comme le suppose la dénivellation générale continue, mais même au-dessus de l'eau libre, au-devant du puits où flotte le bassin du limnimètre ?

Je crois qu'il peut y avoir un effet de ce genre, mais que sa valeur doit être très faible. La nappe d'eau souterraine, relevée par les vagues, se déverse dans le puits du limnimètre et y relève un peu le niveau de l'eau, mais la large ouverture du canal d'alimentation rétablit bientôt l'équilibre. D'un autre côté, cependant, quand les vagues frappent la grève perpendiculairement au canal, chacun de leurs coups refoule dans le puits une masse d'eau qui n'a pas le temps de ressortir entre deux vagues; l'eau est ainsi accumulée dans le puits et soulevée un peu au-dessus de la nappe libre à l'extérieur.

Quelle est la valeur de cette action, indépendamment du soulèvement de la nappe générale? Je ne sais comment les séparer. Tout ce que je puis dire, c'est qu'additionnées, les deux actions peuvent avoir une valeur assez importante. Ainsi, dans certains cas, j'ai pu mesurer et constater qu'elles atteignaient ensemble 4^{cm} environ.

Mais je n'en crois pas moins à une dénivellation réelle de la nappe du lac, indépendamment de l'effet des vagues sur la nappe souterraine ou la nappe de l'enregistreur. Je me base sur trois faits :

a) Les dénivellations que j'étudie sont parfaitement sensibles dans une comparaison entre le limnimètre de Vevey et celui du Jardin anglais de Genève. Quand la bise souffle, il y a parfois une pente renversée de 10 à 12^{cm}. Or, dans ce cas, les vagues sont nulles à Vevey, où le vent souffle de la terre contre le lac, elles sont nulles ou très peu importantes au quai du Jardin anglais de Genève, lequel est situé dans l'intérieur du port. Les dénivellations ne peuvent pas être le produit accidentel des vagues sur les limnimètres.

b) Quand nous étudierons les courants, nous verrons que, lorsque le vent souffle, il existe un courant superficiel, qui chasse l'eau dans le sens du vent, et un courant profond en sens inverse. Ce dernier courant prouve l'existence d'une différence de niveau entre une région plus haute et une région plus basse, l'existence d'une dénivellation.

c) Quand nous étudierons la thermique du lac, nous verrons l'eau de surface s'accumuler dans la région sous le vent en couche fort épaisse ; il y a donc transport de l'eau dans le sens du vent, et il doit en résulter une dénivellation nécessaire.

Quelle est l'action du vent qui cause la dénivellation?

Serait-ce la différence de pression barométrique entre les deux stations? Sans faire intervenir ici les déviations de direction des mouvements cycloniques et giratoires, il est incontestable que le vent inférieur est causé par une différence de pression atmosphérique entre deux points. L'air s'écoule du point où la pression est la plus forte vers celui où elle est la plus faible. La pression est donc la plus forte dans la région d'où vient le vent, la plus faible dans celle où il va. Or une différence de pression doit se traduire par une modification de l'horizontalité de l'eau : le lac est un niveau d'eau dont l'horizontalité ne persiste que si la pression est la même aux deux extrémités. Une

différence de pression barométrique de 1^{mm} de mercure se traduit par une dénivellation de 13.6^{mm} d'eau.

Si donc il y a, d'une extrémité du lac à l'autre, une différence de pression barométrique de 1, de 2, de 3^{mm} de mercure, il doit en résulter, indépendamment de l'action du vent, une dénivellation du lac de 14^{mm}, de 27^{mm}, de 40^{mm} de hauteur. L'eau doit être déprimée là où la pression est la plus forte.

Trouverions-nous là une explication suffisante des dénivellations continues que nous avons constatées? Je n'hésite pas à répondre : Non.

En effet, la différence de pression barométrique entre deux stations du lac ne peut pas être assez grande pour expliquer les fortes dénivellations observées.

Dans les plus violents de nos ouragans, dit Hann [1], le gradient s'élève à 0.2, à 0.3^{mm} par mille géographique (7420^{m}), ce qui donnerait une dénivellation, pour la plus grande longueur du lac, de 1.7 à 2.5^{mm} de mercure, soit 23 à 34^{mm} d'eau.

Or, dans nos vents généraux, bise ou sudois, qui nous donnent les belles dénivellations de 5, 10, 12^{cm} que nous avons vues, le gradient est bien loin d'atteindre cette valeur ; un gradient de 1^{mm} de mercure pour 50 ou 60^{km} est déjà fort serré, et le plus souvent le vent, dans sa rotation spirale, marche presque à angle droit du gradient : la dénivellation barométrique est beaucoup plus faible dans la direction du vent que ne l'indique la valeur du gradient.

La grande valeur des dénivellations continues du lac nous montre qu'elles ne sont pas uniquement dues à une dénivellation barométrique.

Un autre argument arrive à la même conclusion. C'est l'existence d'un courant de retour dans la profondeur, marchant en sens contraire de la direction du vent. Ce courant prouve que dans la dénivellation il n'y a pas un état statique d'équilibre comme celui qui serait causé par une différence de pression, mais un état dynamique, dans lequel l'équilibre, troublé accidentellement, tend sans cesse à se rétablir.

C'est à l'action directe du vent qu'il faut attribuer la plus forte partie des dénivellations continues. Le vent, frottant la surface de l'eau, détermine un courant superficiel qui refoule l'eau contre la plage vers laquelle il souffle, l'y accumule et la relève. Le courant de

[1] Allgemeine Erdkunde, p. 125.

retour profond tend sans cesse à rétablir l'équilibre ; mais, étant une conséquence de la dénivellation, il ne peut s'établir que lorsque la dénivellation a une certaine valeur, et il ne peut pas en annuler immédiatement l'effet.

Nous étudierons plus complètement ce phénomène dans le chapitre traitant des courants du lac.

Toute dénivellation qui élève l'eau vers la sortie du lac augmente temporairement le débit de l'émissaire, et par conséquent tend à abaisser la hauteur moyenne du lac ; et vice-versa. Cela nous amène aux résultats suivants pour le lac Léman, dont l'émissaire, à Genève, est dans la direction du sud-ouest : les vents du N. et N.-E., en augmentant le débit du Rhône de Genève, tendent à abaisser le lac ; les vents du S. et S.-W., en abaissant localement l'eau, à Genève, diminuent le débit de l'émissaire, et font élever le lac.

Grâce donc à la position de l'émissaire du lac, cette action tend à s'additionner à l'effet normal des vents du nord qui sont ordinairement secs et font tarir les affluents, ou à celui des vents du sud, en général accompagnés de pluie et de crue des fleuves et torrents.

Cette action sur le débit de l'émissaire a-t-elle un effet appréciable sur la hauteur du lac ? Calculons-en la valeur dans le cas le plus intense que nous ayons rencontré, la bise du 20 décembre 1877, où la dénivellation entre Morges et Genève a été de 125^{mm}.

A Sécheron, nous voyons une hausse de 80^{mm} pour une hauteur du lac de 1.4^{m} à 1.5^{m}. Si le lac avait été débarré, le débit du Rhône aurait varié pour ces hauteurs du lac de $14^{m^3\ sec}$ par décimètre de hauteur limnimétrique soit, pour 80^{mm}, de $11.2^{m^3\ sec}$. Or nous savons qu'une variation de $6.7^{m^3\ sec}$ dans le débit différenciel des affluents et de l'émissaire amène une variation de la hauteur du lac de 1^{mm}, en 24^{h} [1]. L'effet maximal de cette énorme bise du 20 décembre 1877, si le Rhône avait été débarré, n'aurait donc pas même fait baisser le lac de 2^{mm}. Cet effet est donc inappréciable et peut être négligé.

C'est probablement à des dénivellations analogues à celles que nous venons d'étudier, qu'il faut attribuer les événements suivants qui nous sont racontés par l'histoire de Genève.

[1] T. I, p. 466.

« Le 9 janvier 1495, il y eut un vent tel que le Rhône remonta dans le lac jusqu'à un quart de lieue au-dessus de Genève, et il semblait être une montagne d'eau, ce qui dura l'espace d'une heure.

« Le 2 janvier 1645, entre 7 et 10 heures du matin, après un orage qui avait duré toute la nuit, il s'éleva un vent si violent que le Rhône rentra en partie dans le lac, en sorte que pendant une heure, plusieurs personnes allèrent à pieds secs jusqu'aux chaînes qui ferment le port, et d'autres traversèrent le bras du Rhône qui sépare la Monnaie de l'Ile. » [1]

Ces deux accidents eurent lieu en hiver, saison où les eaux du lac et celles du port sont très basses. Dans les deux cas, il y eut un vent terrible, en 1645 à la suite d'un temps d'orage ; ce sont bien, il est vrai, les conditions de production de seiches considérables, et la grandeur de la baisse de l'eau semblerait indiquer que l'apparition devrait être attribuée à ce genre de dénivellations. Mais il manque dans la description la répétition du phénomène qui serait caractéristique des seiches, et, jusqu'à meilleur avis, nous considérons comme des dénivellations non rythmiques, les événements du 9 janvier 1495 et du 2 janvier 1645.

XI. **Dénivellations temporaires rythmiques. Seiches.**

Sous l'influence d'actions mécaniques diverses, l'eau du lac peut subir une dénivellation temporaire très rapide, dont l'impulsion est assez prompte pour qu'elle se transforme en un mouvement rythmique d'oscillation, de balancement. Sous une impulsion violente et rapide, l'eau subit une dénivellation qui soulève le lac à une des extrémités en le déprimant à l'autre ; l'action dénivellatrice ne dure pas et le lac tend à reprendre son niveau ; mais au lieu de s'arrêter à l'horizontalité, sous l'entraînement du mouvement acquis, il dépasse ce niveau, et pour revenir à l'état d'équilibre stable, il décrit une série d'oscillations de plus en plus faibles. Ces oscillations rythmiques, ou

[1] Registres du Conseil de Genève, cités dans *Picot*, Hist. de Genève, II, 448.

pendulaires, sont connues sur les bords du lac Léman sous le nom de seiches. Nous allons les étudier dans les paragraphes suivants ; je traiterai successivement les points les plus importants :

Historique.
Les seiches, vagues d'oscillation fixe.
Types des seiches.
Allures des seiches.
Causes des seiches.

L'on excusera le développement que je suis obligé de donner à ce chapitre. C'est la première fois que j'ai l'occasion d'exposer d'une manière synthétique les études qui nous ont occupé pendant bien longtemps et qui nous ont amené à l'explication, aujourd'hui certaine dans ses traits généraux, du phénomène des seiches.

HISTORIQUE

Les riverains du Léman appellent seiche un phénomène accidentel, consistant en un mouvement alternatif et répété d'élévation et d'abaissement de l'eau du lac. Dans certaines circonstances, on voit, à Genève, le niveau du lac s'élever lentement, pendant 17 ou 36 minutes, d'une hauteur variable, de quelques centimètres ou quelques décimètres, puis il s'abaisse lentement aussi, d'une quantité à peu près égale, puis il s'élève de nouveau pour s'abaisser encore, et ainsi de suite. On dirait des vagues gigantesques, prodigieusement faibles et prodigieusement lentes ; on dirait des marées en miniatures, à périodes singulièrement rapides.

Cette marée en petites proportions, dont le flux et le reflux n'emploient que quelques minutes pour leur révolution, tout en se répétant parfois plusieurs heures ou plusieurs jours durant, a d'abord été observée et étudiée scientifiquement à Genève, puis sur les autres rives du Léman ; pendant longtemps on l'a considérée comme l'un des phénomènes propres au Léman. On en a constaté l'existence sur les autres lacs, puis sur certaines côtes de la mer.

Je commencerai par résumer les anciennes observations de seiches du Léman ; je citerai ensuite les faits, à moi connus, venant d'autres bassins d'eau ; puis j'analyserai les recherches modernes sur lesquelles notre théorie est fondée.

Histoire ancienne des seiches du Léman.

Les seiches sont signalées, pour la première fois, en 1730, par Fatio de Duillier, ingénieur des fortifications de Genève. Voici sa description qui est classique [1] : « Comme les vents méridionaux, entre le sud et l'ouest soufflent souvent, avec beaucoup d'inégalités et par reprises, il arrive quelquefois, et particulièrement lorsqu'il fait des vents orageux, que, venant à frapper un peu obliquement, ou de haut en bas, sur le grand banc, ils empêchent une partie des eaux de s'écouler : cette partie d'eau, retenue par un vent violent, se hausse peu à peu au-dessus du Travers, tandis que l'eau qui couvre le Travers se baisse de plus en plus. Ensuite, le vent venant à diminuer, ou l'eau venant à surmonter par sa pesanteur l'effort du vent, et à couler avec plus de liberté et en plus grande abondance, on voit dans le même endroit cette eau s'élever de niveau, quelquefois d'un pied ou beaucoup plus, et, pour l'ordinaire, seulement d'environ dix pouces. Il se fait de fois à autres plusieurs de ces abaissements et de ces élévations d'eau, en peu d'heures, qui apportent des changements considérables à la surface du Rhône, et qui causent des véritables flux et reflux. Ils sont très apparents dans quelques fossés de la ville, et particulièrement dans ceux du côté de Plainpalais. Cette sorte de flux et reflux s'appelle à Genève des seiches.

« On a vu quelquefois dans cette ville des seiches très remarquables : il s'en fit trois ou quatre le 16 septembre 1600, avant midi, d'environ 5 pieds de hauteur ; de sorte que les bateaux qui étaient dans le port y restèrent autant de fois à sec ; mais l'eau revenait et s'élevait chaque fois avec beaucoup de promptitude. »

C'est donc à l'arrêt des eaux du Rhône, sur le banc du Travers, par les coups de vent du midi, que Fatio attribuait l'existence des seiches.

Jean Jallabert, pasteur et professeur à Genève, dans une note écrite en 1742 [2], discute la cause des seiches. Il montre d'abord que le flux et reflux se reproduit plusieurs fois par jour, l'intervalle entre deux crues étant de 14 à 15 minutes lorsque les eaux montent de 7 à 8 pou-

[1] *J.-C. Fatio de Duillier.* Remarques sur l'histoire naturelle du lac de Genève in Spon, Histoire de Genève. T. II. p. 463, Genève 1730.

[2] *J. Jallabert.* Seiches ou flux et reflux du lac de Genève. Histoire de l'Acad. royale des sciences, pour 1742. p. 26. Paris 1745.

ces, de 24 à 26 minutes, lorsque les eaux montent d'un pied. Il ne connaît les seiches qu'aux deux extrémités du lac, au Bouveret et à Villeneuve d'une part, et à Genève, d'autre part, depuis 2 ou 3 milles en amont de la ville jusqu'au confluent de l'Arve.

Quant à l'explication que Jallabert en donne, après avoir réfuté la théorie de Fatio en observant qu'elle ne peut s'accorder avec les seiches qui arrivent en temps de calme, comme on l'a souvent remarqué, la voici textuellement : « Dans les temps doux la neige fond, le Rhône (du Valais) s'enfle considérablement et, entrant alors avec impétuosité dans le lac, il en chasse les eaux à droite et à gauche dans les deux petits golfes situés près de son embouchure, et au fond desquels sont Villeneuve et le Bouveret ; ces eaux s'écoulent sur les rives de part et d'autre, retombant ensuite par leur propre poids, devenu supérieur à l'action des eaux du Rhône contre elles, et reprennent le niveau du reste du lac ; et comme l'impétuosité du Rhône, ainsi enflé, subsiste un certain temps, il doit résulter de son action sur les eaux du lac et de la réaction de celles-ci, un flux et reflux qui se succèdent à peu près comme les allées et venues d'un pendule. » De même à Genève par l'action de l'Arve. (1)

Bertrand, dans une dissertation académique non imprimée (2), supposait que des nuées électriques peuvent attirer et soulever les eaux du lac, et que les eaux, retombant ensuite, produisent des ondulations dont l'effet est d'autant plus sensible que les bords du lac sont plus resserrés.

H.-B. de Saussure (3), après avoir admis cette dernière théorie, ajoute : « Je crois aussi que des variations promptes et locales dans la pesanteur de l'air peuvent contribuer à ce phénomène et produire des flux et reflux momentanés, en occasionnant des pressions inégales sur les différentes parties du lac. »

(1) Si Jallabert n'avait pas fait à Addison l'honneur de citer son opinion sur les seiches, je n'en parlerais pas ici, car ce voyageur anglais n'avait aucune compétence pour expliquer les faits de la physique du lac. Voici les quelques mots qu'il leur consacre, dans son récit de voyage, en 1702, c'est la plus ancienne citation à moi connue du phénomène observé sur le Léman : « Le lac présente, en été, une espèce de flux et de reflux de marée, ce qui provient de la plus grande abondance des eaux de fusion des neiges qui entrent dans le lac au milieu de la journée. » *J. Addison.* Miscellaneous Works. IV, 294. London 1745.

(2) Cité par Saussure et Vaucher.

(3) Essai sur l'hist. nat. des environs de Genève. Voyages dans les Alpes. Neuchâtel, 1779. I. 12.

Saussure a observé lui-même une des plus fortes seiches connues sur le lac Léman. Le 3 août 1763, dit-il, dans une des oscillations, l'eau monta de 4 pieds, 6 pouces, 9 lignes (1.47m) en 10 minutes de temps (1). « Ce jour-là, la rivière d'Arve n'avait point éprouvé d'accroissement sensible ; et réciproquement on voit des changements très brusques et très grands dans la hauteur de l'Arve, sans qu'il en résulte des seiches. » Pour ces raisons, Saussure n'accepte pas la théorie des seiches proposée par Jallabert.

Une bonne observation de seiches a été donnée en 1788 par H. Bastard, ministre du S. E. (2). Je la reproduis textuellement. « ..... Je fus témoin, hier 5 juillet au matin, d'une seiche remarquable par sa promptitude et par sa hauteur. Le temps fut orageux entre 6 et 7 heures ; il y eut quelques tonnerres, beaucoup de vent et une forte pluie, qui continua jusqu'à 8 ½ heures, temps où survint un intervalle de calme pendant lequel j'observai cette seiche prodigieuse. L'eau monta d'abord d'environ un pied au-dessus de son niveau, avec une rapidité surprenante, et telle que dans une carpière (étang) qui a communication avec le lac par une ouverture assez spacieuse, le courant occasionné par la seiche était si violent que l'eau bondissait d'environ 5 pouces, lorsqu'on lui opposait un obstacle. Au bout d'un quart d'heure, elle descendit avec la même rapidité à un pied au-dessous de la hauteur ordinaire, ce qui faisait une différence de deux pieds entre le flux et le reflux. Un bateau, qui était à l'eau, se trouva entièrement à sec. Au moment où l'eau reprit son niveau, le vent et la pluie recommencèrent avec une nouvelle force..... »

De 1802 à 1804, le théologien et naturaliste J.-P.-E. Vaucher voua son attention scientifique et son excellente méthode d'observation à l'étude des seiches. Il publia ses recherches dans un mémoire de 60 pages (3) qui est, dans le passé, ce que nous avons de mieux et de plus complet sur le phénomène en question.

Après un court exposé historique, Vaucher donne successivement avec détails l'observation de 10 seiches ou séries de seiches, étudiées par lui du 30 novembre 1802 au 9 janvier 1803. Il se rendait au bord

(1) Histoire de l'Académie pour l'an 1763, p. 18. Paris.

(2) *Journal de Genève*, n° 28, 12 juillet 1788.

(3) *Vaucher*, Mémoire sur les seiches du lac de Genève, composé de 1803 à 1804. Mém. Soc. Phys. VI, 35. Genève 1833.

du lac, et notait de minute en minute l'état stationnaire, l'élévation ou l'abaissement du niveau de l'eau. Voici un exemple de ses observations qui montrera le mode de procéder et donnera une idée de la marche du phénomène. (1)

« Du 30 novembre 1802, aux Eaux-Vives, près Genève. Baromètre 26 p. 10.8 l. Thermomètre + 3°. Hygromètre 82. Ciel pur et sans nuages. »

1h 11m	+ 2mm	1h 36m	+ 27mm
12	+ 2	37	+ 23
13	+ 5	38	+ 18
14	0	39	+ 7
15	— 7	40	+ 5
16	— 9	41	+ 5
17	— 5	42	+ 1
18	— 8	43	+ 1
19	— 8	44	+ 9
20	— 5	45	+ 9
21	— 5	46	+ 2
22	— 6	47	0
23	— 3	48	— 1
24	— 2	49	— 10
25	0	50	— 7
26	— 2	51	— 7
27	— 2	52	— 11
28	— 2	53	— 16
29	— 7	54	— 7
30	— 5	55	— 7
31	— 2	56	— 5
32	+ 5	57	— 5
33	+ 11	57	— 5
34	+ 16	58	— 2
35	+ 18	59	+ .

Vaucher varia avec beaucoup de soin son mode d'observation, et donna en particulier une grande attention à l'étude simultanée des

(1) Pour plus de commodité, j'ai traduit en millimètres les variations de hauteur que Vaucher indiquait en lignes, et je les ai caractérisées par les signes + ou —, suivant que la variation était en crue ou en décrue.

mouvements de l'eau dans deux localités plus ou moins éloignées, sur la même rive ou sur deux rives opposées du lac.

Il chercha ensuite les rapports qui existent entre la fréquence des seiches d'une part, et la saison de l'année ou l'état de l'atmosphère d'autre part. Il constata enfin l'existence des seiches sur les autres lacs suisses qu'il put visiter. Voici les conclusions qu'il formule lui-même à la suite de ses observations : [1]

« 1° Il y a des seiches plus ou moins considérables dans tous les lacs ; ceux dans lesquels on n'en a pas encore aperçu n'ont pas été suffisamment examinés.

» 2° Ces seiches peuvent avoir lieu dans toutes les saisons de l'année et indifféremment à toutes les heures du jour ; mais elles sont en général plus fréquentes au printemps et en automne.

» 3° Rien ne paraît influer davantage sur ce phénomène que l'état de l'atmosphère ; en sorte que plus cet état est constant, moins il y a de seiches, plus il est variable, plus il y en a. C'est ce que prouvent toutes mes observations qui n'ont donné qu'un faible mouvement ou un mouvement nul toutes les fois que le vent du nord soufflait, que le temps était beau, qu'il régnait des brouillards étendus, et que la pluie ou la neige était générale ; tandis que la seiche a toujours été considérable quand l'atmosphère était remplie de nuages pluvieux ou que le temps, d'ailleurs assez serein, se préparait à l'orage et que le baromètre baissait.

» 4° Toutes choses d'ailleurs égales, les seiches sont d'autant plus considérables sur le lac de Genève que l'on s'approche de la sortie du Rhône ; leur maximum est à cette même sortie, et elles diminuent depuis ce point jusqu'au confluent du Rhône avec l'Arve, où elles sont à peu près nulles. Il en est de même en avançant de l'autre côté du lac jusqu'à Coppet, où elles ne sont plus que d'un ou deux pouces, et à Rolle, où elles sont moindres, sans cependant devenir jamais nulles.

» 5° L'extrémité orientale du lac de Genève n'a pas des seiches plus sensibles que celles des autres lacs, quoique l'opinion contraire semble établie dans les ouvrages de De Saussure.

» 6° Quoique les seiches soient plus fréquentes au printemps et en automne que dans les autres saisons, cependant elles sont plus consi-

[1] Loc. cit. p. 75.

dérables en été, et surtout à la fin de cette saison. Les plus grandes qui aient été observées ont toujours eu lieu dans les mois de juillet et d'août ou au commencement de septembre.

» 7° Le minimum des seiches n'a pas de terme, mais leur maximum ne va pas au-delà de cinq pieds.

» 8° Enfin, quoique la durée de la seiche soit très variable, ses limites en plus ne sont guère au-delà de 20 à 25 minutes et restent fort souvent en deçà, tandis que ses limites en moins sont zéro. »

Dans la seconde partie de son mémoire, Vaucher recherche quelle est la cause des seiches, et, après avoir critiqué les théories de ses prédécesseurs, il expose l'explication qui, jusqu'à nos jours, est restée généralement admise. Il cherche la cause des seiches dans les variations de la pression atmosphérique ; après avoir reconnu que les seiches coïncident généralement avec de grands mouvements barométriques, il considère deux régions distinctes du lac. Il suppose que dans l'une la pression barométrique diminue, dans l'autre elle reste constante ou elle s'élève ; ces deux régions sont alors inégalement chargées par l'atmosphère, et le niveau de l'eau doit tendre à s'élever dans la région où la pression barométrique a baissé, doit s'abaisser dans la région où la pression est la plus forte.

« Il faut considérer, » dit-il, « les eaux des lacs comme formant un syphon à une infinité de branches, dont l'une quelconque communique à toutes les autres ; que cette branche centrale correspondant à toutes les autres soit, pour le moment, chargée de la colonne d'air dont le poids doit varier, si cette colonne admet une augmentation de poids ou de tension qui corresponde à une ligne de mercure et par conséquent à 14 lignes d'eau, l'eau subjacente tendra à baisser de 14 lignes, et cette quantité dont elle s'abaissera dans la branche correspondante du syphon, sera la même dont elle s'élèvera dans les autres branches, qui n'auront pas changé de poids puisqu'il faut que l'équilibre subsiste. » (1)

C'est du reste ce que Saussure avait déjà admirablement formulé dans les trois lignes que nous avons citées plus haut.

En 1838, a paru, à Lausanne, un mémoire anonyme en anglais sans aucune valeur scientifique, où l'auteur se perd dans des divagations sur les bulles de gaz de marais qu'il voit sortir du lac. Je ne le cite ici que pour donner un exemple des hypothèses saugrenues que sus-

(1) *Vaucher*, loc. cit., p. 82.

citait le phénomène incompris des seiches qui préoccupait vivement l'imagination des naturalistes. (1)

Une très belle observation de seiche est celle qui a été faite à Genève, en octobre 1841. Vu l'importance de cette observation (ce sont les plus fortes seiches connues sur le Léman), je reproduis presque en entier la lettre où ont été transcrites les notes de M. Veinié, directeur de la machine hydraulique de Genève. (2)

« La journée de samedi 2 octobre 1841, après avoir été couverte, s'est terminée par un orage violent ; vers $7^{1}/_{2}$ h, les éclairs se succédaient sans laisser aucun moment d'intervalle ; une pluie accompagnée de beaucoup de grêlons de petite dimension tombait avec abondance. Pendant le peu de temps que dura cet orage (trois quarts d'heure environ), le lac éprouvait des variations de niveau fort rapides et fort considérables ; aucune observation exacte n'a pu être faite au limnimètre du Grand-Quai qui accuse la hauteur du lac, ni à celui de la machine hydraulique qui détermine celle du Rhône, parce que ces variations étaient si grandes qu'elles dépassaient l'échelle de ces instruments.

» Dimanche, 3 octobre, à 4 h du matin, un nouvel orage a éclaté, moins violent que celui de la veille ; cet orage a, comme le précédent, été accompagné de variations dans le niveau de la hauteur du lac ; on a observé le limnimètre, mais on n'a pas pu tenir compte des variations qui ne pouvaient être accusées par la raison ci-dessus mentionnée : ce n'est que depuis 5 h qu'on a pu faire les observations exactes dont je vais donner les résultats.

(1) On the phenomenon called *the Seiche*, observed on the lake of Geneva. Lausanne 1838. — Après avoir résumé assez bien, d'après Vaucher, les allures des seiches, notre anonyme continue, je traduis : « Ce qu'elles ont de plus remarquable, c'est la rapidité avec laquelle elles montent et descendent, la facilité avec laquelle elles changent la direction de leur mouvement. C'est là un caractère qui n'appartient qu'au règne animal..... il y a là, volonté et intention..... Le phénomène est vraiment terrifiant. On dirait qu'un vaste gouffre, ou mieux encore, une gigantesque gueule ait entrebâillé ses mâchoires formidables au fond du lac. L'eau, toute la masse du lac baisse, en quelques instants, de plusieurs pieds au-dessous de son niveau, puis elle s'arrête dans sa chute. Pourquoi ? Qui saurait le deviner ? Un peu plus, et tout le lac allait être englouti, absorbé, cela est certain, par dessous les racines des montagnes, jusque dans quelque océan éloigné. Mais n'est-ce pas épouvantable ? Si un lac peut ainsi disparaître subitement devant nos yeux, sous nos pieds, sommes-nous encore assurés de la solidité des montagnes ? Y a-t-il vraiment encore quelque part quelque chose de stable ? »

(2) Lettre de M. *Oltramare* à M. Arago sur une seiche du lac de Genève. Comptes rendus de l'Acad. des Sc. de Paris, XIII, 829. 18 octobre 1841.

« La hauteur moyenne du lac, vendredi et samedi, avant l'orage, était de 55 pouces (du pied de roi) au-dessus du zéro du limnimètre. A 6 ½ h, le limnimètre marquait 90 pouces au-dessus du zéro, c'est le point le plus haut auquel on l'ait observé ; à 9 h 5 min, il marquait 21 pouces au-dessus du zéro, c'est le point le plus bas où on l'ait vu. En prenant la différence entre cette plus grande et cette plus petite hauteur, on trouve 5 pieds 9 pouces (1.87m), différence qui s'est effectuée dans l'espace de 2 ½ heures. Jusqu'à ce jour, les plus grandes différences consignées dans les registres étaient celle du 26 juillet 1810, qui était de 26 pouces (0.71m) et celle du 11 juillet 1837, de 24 pouces (0.65m).

« De 6 à 10 heures, le limnimètre n'est pas resté un seul moment en repos ; il a passé successivement par un grand nombre de variations, tant au-dessus qu'au-dessous de 55 pouces ; on a observé 5 maxima principaux, accompagnés d'autant de minima, et les différences de niveau entre ces maxima et ces minima étaient de 45 pouces environ...

« Quant à l'état de l'atmosphère, à la surface de la terre soufflait un vent du nord assez faible, tandis qu'au contraire les nuages étaient violemment poussés par le vent du sud-ouest. La pluie tombait d'une manière continue, sans aucun tonnerre. (Le thermomètre marquait + 13° R.) Une circonstance fort remarquable, c'est que le baromètre n'a subi, pendant tout le temps de ces observations, aucune variation (il marquait 26 ¾ pouces). (1)

« A 3 h après midi, il s'est fait sentir un coup de vent très violent et, au même moment, le niveau de l'eau s'est abaissé fortement, mais cependant beaucoup moins que le matin. »

Dans son étude sur le Rhône et le lac de Genève (2), L.-L. Vallée émit, en 1843, une théorie de haute fantaisie que nous ne prendrons pas la peine de discuter ; elle a du reste déjà été exécutée par J. de

(1) Le baromètre était en baisse rapide ; voici les hauteurs données par l'Observatoire de Genève :

2 octobre	9h matin	724.65mm
	midi	722.85
	3h soir	721.25
	9h »	722.04
3 octobre	9h matin	722.21
	midi	722.01
	3h soir	719.11
	9h soir	717.64

(2) *L.-L. Vallée.* Du Rhône et du lac de Genève, p. 31 sq. Paris 1843.

La Harpe [1]. Je la cite, non pas pour me railler des écarts d'imagination d'un homme qui, quoique trop prompt dans ses hypothèses, a cependant rendu de bons services à l'étude de notre lac, mais comme un exemple typique de la fascination qu'exerçait sur les esprits le phénomène mystérieux des seiches, et des hypothèses qui surgissaient de toutes parts pour tenter de l'expliquer.

« Concevons » dit Vallée « qu'il y ait un lac souterrain communiquant, d'une part avec le Léman, et d'autre part au moyen de fissures avec les vallées qui contiennent les glaciers ; si, par l'effet d'une pluie, par exemple, les eaux et les glaces se précipitent dans les fissures, dont quelques parties soient verticales, ou à peu près verticales, elles parcourront ces fissures avec une vitesse accélérée et elles y entraîneront l'air comme il est entraîné dans les trompes au moyen desquelles, avec le secours d'un petit courant d'eau on souffle le foyer des hauts-fourneaux ; donc l'air sera comprimé au-dessus du lac souterrain ; donc les eaux du Léman se soulèveront. Bientôt après, l'effet compresseur cessant, les eaux soulevées réagiront ; l'air remontera dans les fissures ; le lac souterrain s'élèvera, et le Léman s'abaissera au-dessous de son niveau, mais d'une moindre hauteur que celle dont il se sera élevé, parce que les fissures présenteront des courants d'eau marchant de haut en bas, qui modèreront le mouvement de l'air marchant de bas en haut. Une nouvelle réaction résultera ensuite de l'exhaussement du lac souterrain, et le phénomène cessera par une suite d'oscillations de moins en moins fortes. »

Al. Yersin a publié, en 1855 [2], une courte note sur des observations de seiches entreprises, à Morges, dès 1854. A l'appel d'une dépêche télégraphique lancée de Morges, divers observateurs, à Genève, Nyon, Lausanne, Vevey, suivaient de quart d'heure en quart d'heure les variations du limnimètre et du baromètre. Par cette méthode ont été étudiées les seiches du 1er avril, 4 mai, 16 novembre, 13 décembre 1854, 3 février, 31 mai 1855, et 12 avril 1856. Ces observations, conçues dans un esprit scientifique excellent, n'ont malheureusement pas été utilisées. Dans la note que j'ai citée, A. Yersin a figuré graphiquement la courbe d'une série de seiches du 3 décembre 1854, observées dans le port de Morges. C'est, à ma connaissance, la pre-

[1] Bull. S. V. S. N. VI, 9.

[2] *A Yersin.* Note sur les seiches du lac Léman. Bull. S. V. S. N. IV, 411. Lausanne, 1855.

mière utilisation de la méthode graphique pour l'étude du phénomène. Malheureusement pour Yersin, l'irrégularité de ces seiches était telle (4 seiches de 5 minutes de durée, et 1 de 10 minutes), qu'il ne sut pas y reconnaître le rythme régulier des vagues d'oscillation fixe. Il indique cependant parfaitement le caractère oscillatoire du mouvement des seiches.

Histoire ancienne des seiches d'autres lacs.

Les notes anciennes que nous possédons sur les seiches des lacs autres que le Léman sont peu nombreuses et mal ordonnées. Des apparitions analogues à celles de Genève ont été observées, tout au moins sous la forme de dénivellations plus ou moins rapides et plus ou moins répétées; on a pu ainsi constater que le phénomène n'est pas spécial au Léman comme on l'avait cru d'abord. Mais son étude systématique n'a été entreprise nulle part, et nous ne pouvons pas tirer grand' chose des faits isolés dont nous allons citer quelques exemples.

Lacs subalpins. Une observation très curieuse de seiches, la plus ancienne de celles que nous possédions sur les lacs, a été trouvée par M. L. Leiner, directeur du Rosgartenmuseum, à Constance, dans les Chroniques de Christophe Schulthaiss [1]. En voici la traduction. Elle décrit un phénomène constaté dans le port de Constance.

> « Crue admirable de l'eau. Dans ce jour, la veille de St-Mathieu, (le 23 février 1549), pendant la matinée, le lac a cru et décru successivement d'une hauteur d'une aune (environ 60cm), de telle manière que pendant sa crue il est entré dans la Wette jusqu'à l'angle de l'hôpital, puis, dans sa descente, il s'est écoulé par la grève d'abordage au pont des Pêcheurs. Puis, avec un courant violent, comme si les vagues avaient été refoulées par le vent (le temps était cependant calme) il s'est élevé de nouveau. Et cela s'est répété quatre ou cinq fois dans la durée d'une heure, comme j'en ai moi-même été le témoin. Les mouvements ont continué jusqu'après midi, mais en diminuant de plus en plus d'intensité. Le même phénomène a été observé sur le cours du Rhin (entre les deux lacs); quelques pêcheurs voulaient

[1] *Schulthaiss Christoph*, Collectanea VI, 81.

aller lever leurs nasses dans le fleuve, mais ils ont reconnu que le Rhin coulait dans la direction de la ville et du pont des Pêcheurs, tandis qu'ordinairement il coule en sens inverse. — Tout cela a causé un vif étonnement et une grande admiration, car un tel phénomène n'avait jusqu'à présent, à ce que l'on dit, été observé par personne. »

Pendant qu'il étudiait les seiches de Genève, Vaucher faisait rechercher des mouvements analogues de l'eau sur les autres lacs suisses. Ses correspondants en ont constaté et décrit dans les lacs de Zurich, de Constance et des Quatre-Cantons ; lui-même en a vu dans les lacs d'Annecy, de Lugano et dans le lac Majeur ; en revanche, les seiches lui ont échappé dans le lac de Côme. (1)

En 1826, le professeur Ineichen a observé des seiches sur le lac des Quatre-Cantons, à Lucerne. (2)

Lacs d'Europe. Une très belle observation de seiches est celle des oscillations de l'eau qui sont survenues à Kenmore, en Ecosse, le 12 septembre 1784 ; la hauteur de la vague a été évaluée à 1.5m, et la durée de l'oscillation qui s'est continuée pendant plusieurs heures de suite était d'environ 7 minutes. (3)

Muncke cite des observations de seiches dans le lac Wetter, par Bergmann, et dans le lac Ochrida (Roumélie), par Ami Boué. (4)

Lacs américains. De nombreuses observations sur les dénivellations accidentelles de l'eau ont été faites, et déjà fort anciennement, dans les grands lacs de l'Amérique du Nord ; on était préoccupé d'y rechercher une marée luni-solaire, et l'attention se dirigeait avec persistance sur tous les faits d'oscillation de l'eau. John Le Conte, professeur à l'Université de Californie, dans le paragraphe qu'il a consacré aux seiches dans ses recherches physiques sur le lac Tahoe (5), arrive cependant à la conclusion que « de véritables seiches n'ont pas encore été constatées dans les lacs américains ; les dénivellations décrites par les auteurs peuvent bien avoir été des seiches, mais la pério-

(1) *Vaucher*, [loc. cit. p. 43] p. 69, sq.

(2) *R. Wolf.* Notizen zur schw. Culturgeschichte n° 352.

(3) Bibliothèque britannique; sc. et arts, VI, 184. Genève 1797.

(4) *Gehler.* Physik. Wörterbuch, 2e éd. VIII, p 737. Leipzig 1836.

(5) *John Le Conte.* Physical Studies on lake Tahoe. Overland Monthly. januar 1884. p. 43.

dicité rythmique qui est caractéristique de ce phénomène n'a pas été reconnue. » Il cite cependant les observations de dénivellations de l'eau dues à Fra Marquette, 1673, baron la Hontan, 1689, Charlevoix, 1721, Carver, 1766, Weld, 1796, etc.

Dans un mémoire présenté, en 1874, à l'Association américaine pour l'avancement des siences, M. Ch. Whittlesey, de Cleveland, Ohio, a donné un résumé historique des anciennes observations de dénivellations de l'eau faites sur les lacs américains [1] ; il en cite 18 cas ; je choisis les plus typiques, ceux où l'on reconnaît l'indice d'un flux et reflux répétés.

« Lac Supérieur. En 1789, A. Mackenzie était au Grand-Portage, sur la côte nord, opposée à l'Isle-royale ; il raconte qu'il y eut une baisse soudaine de l'eau de 4 pieds de chute ; l'eau revint bientôt en un flot montant et continua à osciller pendant plusieurs heures de suite.... »

« Le 16 juillet 1855, au Sault-Ste Marie, vers $9^{h\,m}$, l'eau s'éleva rapidement de 8 pouces dans le canal, par une légère brise du N.-W. ; en 10 minutes, elle s'abaissa de 14 pouces ; à 11^h elle s'abaissa encore de 2 pieds 2 pouces ; elle continua à s'élever et s'abaisser jusqu'à $4^{h\,s}$ où elle reprit son niveau primitif. Pendant ce temps, le vent avait tourné au S.-E.... »

« Le 17 septembre 1865, à Superior-City, flux et reflux de l'eau. Entre $12\,{}^1/_2{}^h$ et 1^h après midi, l'eau du lac mesurée au limnimètre s'est abaissée de 25 pouces ; 15 minutes après elle était remontée à 25 pouces au-dessus du niveau primitif, faisant une dénivellation totale de 50 pouces (1.27^m) en un quart d'heure. Le vent soufflait très fort du N.-W.... »

« En novembre 1851, à Copper-Harbour, d'après M. Brockway, l'eau s'éleva soudainement, par un temps parfaitement calme, à 1 pied 3 pouces, et une autre fois à 2 pieds et demi.... »

« Lac Seneca. En mai 1855, pendant toute la journée de mercredi et de jeudi, l'eau du lac s'éleva et s'abaissa en périodes variant de 10 minutes à une demi-heure, de hauteurs variant de 5 pouces à 2 pieds. Une mesure faite le vendredi après le coucher du soleil montra une baisse de 16 ${}^1/_2$ pouces en 15 minutes, après quoi l'eau commença à se relever.... »

[1] G.-H. *Whittlesey*. Sudden fluctuations of level in quiet waters. Proceed. of the Hartford meeting's, August 1874. p. 139 sq.

« Lac Erié. Une note manuscrite de M. Whittlesey me communique, malheureusement sans détails, l'observation de « la plus haute seiche connue » qui a offert une dénivellation de 15 pieds (4.57^{m}) le 23 juin 1882, à Cleveland, Ohio.

En résumé, des dénivellations plus ou moins rythmiques ou plus ou moins répétées, quelques-unes très fortes, ont été constatées sur un grand nombre de lacs. C'est là tout ce que nous tirons de ces observations.

Recherches modernes sur les seiches.

Je vais maintenant raconter la série des observations, expériences et déductions qui m'ont amené à proposer la théorie actuelle des seiches ; cette théorie a reçu assez de confirmations expérimentales pour qu'elle ait été généralement bien accueillie ; nous osons prétendre qu'elle donne une explication suffisante du phénomène dans ses grandes lignes, et souvent même dans ses détails.

Ma première série d'observations (1) a été faite à Morges, sur les courants qui se développent, en temps de seiche, aux entrées du port. Le bassin fermé du port représente une nappe d'eau dormante, à niveau relativement stable ; quand le lac s'élève, l'eau entre dans le port, quand le lac baisse, l'eau sort du port ; en cas de dénivellations rapides du lac, les courants sont assez intenses aux bouches du port pour être très visibles, et, en notant l'instant où les courants changent de direction, on obtient des valeurs assez exactes sur la durée des oscillations de l'eau. Du 7 mai 1869 au 11 mai 1870, j'ai fait 12 séries d'observations sur ces courants, observations qui ont porté sur un total de 93 inversions dans la direction des courants. (2)

(1) *F.-A. Forel.* Ire étude sur les seiches du lac Léman. Bull. S. V. S. N. XII, 213. Lausanne 1873.

(2) Le port de Morges, entièrement fermé par deux jetées qui s'avancent dans le lac, présente actuellement deux ouvertures : l'une de 30^{m}, servant au passage des bateaux, est difficilement abordable pour l'observateur ; l'autre ouverture, de 2^{m} de large, percée dans la jetée du nord, en 1854, pour le renouvellement de l'eau du port, est située au bord d'un quai, et peut être facilement surveillée. Or, chaque fois qu'il se produit une différence quelconque dans le niveau de l'eau, à l'intérieur ou à l'extérieur du port, chaque fois que l'eau du lac s'élève ou s'abaisse, l'eau contenue dans le port tendant à regagner le niveau du lac, il se développe, à ces deux ouvertures, un courant plus ou moins violent, d'entrée alors que le niveau du lac s'élève, de sortie alors qu'il s'abaisse. Ce courant est facilement observable à la

J'ai bientôt reconnu par les allures du phénomène que j'étais en présence d'un mouvement d'oscillation de l'eau ; que, en négligeant certaines irrégularités, ce mouvement est en général régulier; enfin

petite ouverture de la jetée du nord et devient très visible toutes les fois qu'une seiche vient modifier le niveau des eaux. En surveillant le moment où se font les changements de direction du courant, l'on peut apprécier facilement la durée de la séiche. Je donnerai deux exemples de ces observations.

Du 7 mai 1869.

Heure du commencement du courant d'entrée.	de sortie.	Durées en secondes de la seiche (*) haute.	basse.
—	9h 26m 10s	—	135
9h 28m 25s	30 00	95	120
32 00	34 00	120	135
36 15	38 30	135	140
40 50	43 05	135	115
45 00	46 20	80	100
48 00	49 45	105	135
52 00	54 30	150	165
57 15	59 30	135	—

Durée moyenne de la seiche entière 254 secondes

Du 21 mai 1869.

Heure du commencement du courant d'entrée.	de sortie.	Durée en secondes de la seiche haute.	basse.
2h 40m 00s	2h 42m 30s	150	180
45 30	48 20	170	150
50 50	53 10	140	140
55 30	—		—

Durée moyenne de la seiche entière 315 secondes.

Voici les chiffres moyens que j'ai obtenus dans mes 12 observations sur les courants du port de Morges. Je donne la durée de l'oscillation entière, c'est-à-dire du temps employé pour que l'eau recommence à s'élever après s'être élevée et abaissée.

	Date.		Durée de la seiche entière.
I	7 mai 1869	9 h. matin	254 secondes
II	19 — —	7 soir	210
III	21 — —	11 matin	331
IV	— — —	2 soir	315
V	— — —	5 soir	216
VI	28 — —	2 soir	244
VII	— — —	7 soir	225
VIII	10 septembre 1869	6 soir	327
IX	2 octobre —	4 soir	266
X	29 novembre —	2 soir	310
XI	9 mai 1870	9 matin	288
XII	11 — —	5 soir	247

La durée moyenne générale, d'après ces observations des courants du port de Morges, serait de 264 secondes pour l'oscillation complète de l'eau, soit 4 minutes et 24 secondes. (Voir Ire étude, p. 227.)

* En anticipation de ce que j'exposerai plus loin, j'appelle ici seiche haute et seiche basse la partie de l'oscillation de l'eau qui est au-dessus et au-dessous du niveau moyen de l'eau, seiche entière, le mouvement complet de l'eau qui revient au point de départ après une révolution entière.

que ce mouvement est assez rapide, l'oscillation de l'eau ayant une durée moyenne de 4 ½ minutes.

Les seiches de Morges sont donc une oscillation rythmique du lac.

Cette constatation faite, je me suis reporté aux observations classiques des seiches de Genève (H.-B. de Saussure, Vaucher, Veinié, etc.) ; j'y ai cherché et j'y ai retrouvé les mêmes caractères du mouvement oscillatoire. Mais en même temps j'ai constaté que la durée de l'oscillation y est beaucoup plus longue qu'à Morges. De 7 observations de Vaucher j'ai tiré la valeur moyenne de 26 ½ minutes pour la durée de la seiche entière à Genève. (1)

Il y a là des irrégularités plus grandes encore qu'à Morges; mais cependant je n'hésitai pas à admettre que les seiches de Genève sont, elles aussi, une oscillation rythmique du lac.

Ainsi donc, aussi bien à Morges qu'à Genève, je me trouve en présence d'un mouvement oscillatoire plus ou moins régulier de l'eau. Ce sont donc des vagues.

Mais ces vagues ont une durée énorme, 4 ½ minutes à Morges, 26 ½ minutes à Genève, c'est-à-dire 60 ou 30 fois plus grande que celle des plus grandes vagues du Léman, qui en temps d'ouragan ne dépassent pas 5 secondes. Ce sont donc des vagues d'une autre na-

(1) Voici le tableau que j'ai dressé de la durée en minutes des observations de Vaucher, après que, pour en faciliter l'intelligence, je les eus établies en courbes graphiques.

N°	Seiche montante.	Seiche descendante.	Seiche entière.
I	—	6	—
—	11	6	17
II	18	13	29
III	—	21	—
—	9	11	30
IV	—	5	—
—	22	(16)	27
VI	4	18	22
—	24	—	42
IX	—	14	—
—	13	—	27
X	12	6	18

D'où nous obtenons la durée moyenne de la seiche entière de 26 ½ minutes.

Il est vrai que l'observation n° VIII de Vaucher nous donne des valeurs bien différentes, une durée moyenne de 8 minutes pour la seiche entière. Mais ces seiches appartiennent évidemment à un type tout différent ; laissons-les de côté pour le moment. (Voir Ire étude, p. 230.) Nous verrons du reste que la durée réelle des seiches ordinaires de Genève est beaucoup plus grande que cette valeur de 26 ½ minutes, obtenue par quelques observations isolées de Vaucher : elle est en réalité de 73 minutes.

ture que celles du vent ; ce ne sont pas, comme les vagues du vent, des vagues d'oscillation progressive. Ce sont donc des vagues d'oscillation fixe. Ce sont des vagues de balancement, analogues à celles qui se développent dans une cuvette, dans une baignoire, dans un bassin quelconque dont l'eau est mise par un choc en état de balancement pendulaire ; l'eau s'élève à une extrémité du vase pendant qu'elle baisse à l'autre, et vice-versa.

Si cela est, les seiches de durée différente de Genève et de Morges doivent correspondre à un balancement différent, ou oscillant suivant des axes différents du lac. J'ai supposé que les seiches à longue période de Genève seraient dues au balancement du lac suivant sa longueur, dans le sens Villeneuve-Genève et retour ; que les seiches de Morges seraient dues au balancement du lac suivant sa largeur, de la côte suisse à la côte savoyarde, de Morges à Evian et retour.

Cette supposition, très simple, demandait à être développée et vérifiée.

Pour cela, j'ai cherché à étudier les vagues de balancement dans les conditions où je pouvais les obtenir, à savoir dans le bassin fermé du port de Morges, et dans une auge à expérience.

Dans le port de Morges, bassin de 200^{m} environ de longueur, les vagues de balancement ont une durée de 22.5 secondes. (1)

Dans une auge d'expérience, analogue à celle des frères Weber,

(1) Pendant l'hiver de 1869 à 1870, les eaux du lac étant fort basses, l'angle nord du port de Morges présentait une petite grève dont la pente était si peu inclinée que les moindres dénivellations de l'eau s'y faisaient voir à merveille, le calme absolu du bassin fermé de toutes parts facilitant encore l'observation. Je remarquai que fréquemment on pouvait y reconnaître des oscillations rythmiques de l'eau qui s'élevait et s'abaissait suivant une périodicité régulière. J'en mesurai la durée, et trouvai comme valeur moyenne, en secondes :

Date.	Vent.	Nombre d'oscillations.	Durée moyenne d'une oscillation.
6 janvier	léger morget	9	21.1^{sec}
7 —	légère bise	10	33.5
9 —	—	18	21.2
20 —	—	16	17.5
5 mars	—	14	15.3
10 —	—	16	14.7
12 —	léger sudois	6	34.1

Durée moyenne générale, 22.5 secondes. Cette durée est tellement supérieure à celle des plus grandes vagues du vent (4 à 5 secondes en tempête), qu'il n'y a pas moyen que la nature en soit la même. Toutes les observations ont du reste été faites par un vent assez faible pour que l'eau du port fût au calme presque parfait.

Je n'ai pas hésité à reconnaître dans ces oscillations un mouvement de balance-

j'ai pu obtenir les vagues de balancement pour diverses profondeurs d'eau et pour différentes longueurs du bassin. J'en ai tiré les lois de l'oscillation de balancement que je résumerai plus loin.

Les faits jusqu'alors recueillis me donnaient les résultats généraux suivants pour la durée en secondes de l'oscillation de l'eau :

Oscillation de balancement dans une auge de 1.3^{m} de longueur et 35^{cm} de profondeur	1.6^{sec}
Seiches du port de Morges	22.5
Seiches du lac à Morges	264
Seiches du lac à Genève	1590

La durée des oscillations était suffisamment proportionnelle à la grandeur du bassin dans lequel l'eau oscillait.

Les lois et faits d'expérience répondaient si bien aux phénomènes observés dans la nature que je n'hésitai plus à énoncer l'hypothèse que les seiches sont des vagues d'oscillation fixe ou vagues de balancement; que l'eau balance d'un bout à l'autre du lac comme elle balance d'un côté à l'autre d'une cuvette ou d'un verre à boire; que les seiches rapides de Morges sont des vagues de balancement établies suivant le diamètre transversal du lac, que les seiches plus lentes de Genève oscillent suivant le diamètre longitudinal.

Comme preuve expérimentale, je demandais la constatation de la durée des seiches à l'extrémité orientale du lac, à l'autre extrémité du diamètre longitudinal de Genève; les seiches devaient y avoir la même durée qu'à Genève.

Cet *experimentum crucis*, je l'ai obtenu en 1873 en allant chercher à Veytaux près Chillon le rythme des seiches. A l'aide d'un appa-

ment de l'eau du port, des *seiches du port* de Morges, analogues à celles du lac, mais diminuées et rapetissées en raison des dimensions minimes du bassin.

Ces seiches du port de Morges sont de hauteur si faible, 2 à 3^{mm} au plus, qu'elles ne sont manifestes que lorsqu'elles viennent battre sur une plage très peu inclinée.

Quant à l'origine de ces vagues de balancement du port, je les attribue à deux causes différentes :

a) Au vent. Les observations que j'ai citées ont toutes été faites alors qu'un vent peu violent agitait légèrement l'atmosphère et causait des changements irréguliers de pression sur les différentes parties du bassin.

b) A la vague puissante que les bateaux à vapeur refoulent devant eux, et font engouffrer brutalement par les entrées du port : dans ce cas, les seiches du port ont une hauteur plus forte que lorsqu'elles sont causées par le vent, et elles deviennent même observables par des courants alternatifs aux ouvertures des jetées. (Voir Ire étude, p. 235.)

reil très sensible, le *plémyramètre*, dont l'application facile m'a été d'une grande utilité dans ces recherches, j'ai pu constater que la durée des seiches à Veytaux était, comme à Genève, très supérieure à celle de Morges. La durée que j'ai trouvée à ces seiches longitudinales était de 1783 secondes, soit 56 minutes environ. (1)

A l'aide du plémyramètre, j'ai pu, en 1873 et 1874, étudier avec plus de sûreté les seiches de Morges (seiches transversales) et la durée que je leur ai attribuée alors (10 ½ minutes) se rapprochait beaucoup plus de la vérité. En même temps, j'arrivais à discerner dans quelques-unes des observations de Morges les seiches longitudinales du lac, peu apparentes, car Morges est situé très près de la ligne nodale de ces seiches, mais assez nettes cependant pour que j'en aie pu reconnaître à peu près exactement la durée, que j'estimai être de 75 ½ minutes.

Je transportai alors mon appareil sur divers lacs suisses, 1874, et je mesurai la durée des seiches des lacs de Constance, de Neuchâtel, de Thoune, de Walenstadt, de Brienz, de Morat, de Joux et de Bret; la durée des seiches que j'obtins dans cette recherche me donna une série régulièrement croissante avec la longueur du lac; je ne rencontrai qu'une seule exception, le lac de Joux, dont la faible profondeur, 25m seulement, explique le ralentissement tout à fait anormal du rythme des seiches. (2)

Enfin, des observations simultanées faites aux deux extrémités du lac de Neuchâtel me montrèrent l'eau s'élevant à l'un des bouts du

(1) *F.-A. Forel*, IIe étude sur les seiches. Bull. S. V. S. N., XIII, 510, Lausanne, 1875.

(2) Voici la durée que mes observations plémyramétriques m'ont donnée pour les seiches longitudinales de quelques lacs suisses: je les ordonne en série d'après la longueur des lacs. (Voir IIe étude, p. 562.)

Lac.	Durée.
de Bret,	64 secondes.
de Joux,	744
de Morat,	572
de Brienz	588
de Walenstadt,	871
de Thoune,	1116
de Neuchâtel.	2840
Bodan,	3594
Léman,	4534

Ces chiffres n'ont rien de définitif : plusieurs d'entr'eux demandent des corrections importantes. Quelques-uns sont déjà corrigés par les observations que nous possédons aujourd'hui (voir plus bas).

lac en même temps qu'elle s'abaissait à l'autre bout, et cela d'une manière si précise et si concordante que je jugeai la question démontrée (1874).

Toutes ces expériences et observations justifiaient parfaitement l'hypothèse, et m'autorisaient, dans ma IIe étude, à l'élever à la dignité de théorie. Les seiches sont bien des vagues de balancement de l'eau des lacs.

En 1876, j'ai construit à Morges un limnimètre enregistreur, ou limnographe, variante des marégraphes de l'océan, appareil très sensible qui a fonctionné à satisfaction jusqu'en 1884, et m'a permis une étude plus précise des allures et types des seiches. J'ai reconnu sur mes tracés limnographiques de Morges l'existence d'un type normal, presque constant, de 10 minutes de durée, les seiches transversales du Léman, quelques types anormaux de durée ou plus forte ou plus faible que 10 minutes, puis l'apparition fréquente du type normal des seiches longitudinales du lac de 73 minutes de durée; j'ai étudié les allures des seiches, leur apparition, leur décroissance, leurs causes, etc.

En 1876 aussi, j'ai enfin obtenu ce que je réclamais depuis longtemps des mathématiciens, mes amis : les éléments d'une formule des seiches. M. le professeur K. Von der Mühl m'a indiqué une formule de Rodolphe Merian de Bâle qui exprime les mouvements d'une molécule d'eau oscillant dans un vase. Cette formule, tirée de considérations de mécanique pure, s'appliquait parfaitement aux faits observés dans la nature; nous avons pu l'adopter pour la formule des seiches, en la simplifiant sous la forme :

$$t = \frac{l}{\sqrt{g\,h}}$$

En 1877, j'ai utilisé les diverses observations connues pour essayer une monographie des seiches du lac Léman. Je suis arrivé à constater pour la première fois l'opposition synchrône du mouvement des seiches longitudinales de Morges et de Genève. La description générale que j'ai donnée à cette époque s'est vérifiée depuis lors, sauf sur un point. Les seiches que j'avais constatées à Veytaux, à Chillon, à Vevey (H. Dufour), avaient une durée moyenne de 35 minutes, différentes des seiches longitudinales de 73^{min} que mon limnographe de Morges me montrait. Faute d'éléments suffisants de comparaison à Genève,

j'ai supposé que ces seiches de 35^{min} seraient des seiches partielles du lac, oscillant dans le bassin du grand lac, de Villeneuve à Yvoire. Nous verrons plus loin que cette interprétation était probablement fausse, et que ce sont des seiches binodales du lac dans son ensemble. (1)

Cette même année 1877, M. Ph. Plantamour, de Genève, a établi son limnographe de Sécheron, magnifique appareil qui a donné et donne encore des tracés du plus haut intérêt, et a complété la connaissance des seiches du lac Léman. Il a fait voir entr'autres qu'à Genève les seiches présentent deux types principaux, les seiches de 73^{min}, seiches uninodales, et les seiches de 35^{min}, seiches binodales. Ce fait important écartait toutes les difficultés suscitées par les observations insuffisantes de Vaucher, et rendait compte des seiches rapides de Veytaux ; celles-ci ne sont autres que les seiches longitudinales binodales.

En 1878, j'ai donné une description des allures des seiches ; j'ai constaté qu'elles se développent subitement et forment une série d'oscillations dont l'intensité est régulièrement décroissante. Puis j'ai recherché les causes des seiches, qui sont multiples, et se rattachent aux différentes perturbations atmosphériques, en particulier au coup de vent descendant de l'orage local. Je ne suis pas arrivé, en revanche, à fournir la preuve expérimentale de l'origine des seiches cherchée dans les tremblements de terre.

La même année, j'ai construit un limnographe portatif et j'ai commencé l'étude des seiches dans diverses régions du lac.

En 1879, le grand ouragan du 20 février donna à M. Ph. Plantamour l'occasion d'étudier le développement des seiches énormes causées par cette perturbation atmosphérique.

En 1879 aussi, M. Ed. Sarasin, de Genève, fit construire un limnographe portatif très pratique, qu'il a successivement établi à la Tour-de-Peilz, Chillon, Rolle, et dans diverses stations des environs de Genève.

Ses observations de la Tour de Peilz lui ont servi à démontrer le synchronisme, et la similitude de direction des mouvements des seiches de 35^{min} à Genève et à l'extrémité orientale du lac. L'eau mon-

(1) Cependant cette interprétation a été en partie reprise par M. P. du Boys, comme nous le verrons plus loin.

tait simultanément dans les deux stations. C'était la preuve de la nature binodale de ces seiches de 35min.

En 1880, les ingénieurs des Ponts et Chaussées français établirent à Thonon un limnographe qui nous a fait connaître le type des seiches de cette station.

En 1880 aussi, J.-L. Soret nous a donné l'explication des courbes intéressantes données par l'interférence sur les tracés de Genève des seiches longitudinales uninodales et binodales, ce que j'ai appelé les seiches dicrotes.

Signalons encore les études, tout à fait indépendantes, faites en 1885 sur le lac George, province de Murray, Nouvelles Galles du Sud, par M. H.-C. Russell, directeur de l'observatoire de Sidney. Les faits et lois que nous étudiions depuis plusieurs années de ce côté-ci de la terre, ont été découverts à nouveau par nos collègues des antipodes, et la vérification qu'ils en ont donnée n'a pas été sans nous offrir grand intérêt et encouragement précieux.

Entre temps, j'étais arrivé, en 1879, à appliquer heureusement la théorie des seiches à la solution du problème de l'Euripe. Mon hypothèse, adoptée par M. le capitaine Mansell, de la marine anglaise, l'observateur original et sagace des courants de l'Euripe, combattue par le capitaine A. Miaulis, de la marine grecque, a reçu, en 1888, la confirmation très autorisée de M. O. Krümmel, l'auteur du IIe volume du *Handbuch der Ozeanographie*.

En 1886, M. Ed. Sarasin établit son limnographe à Zurich, et étudia les seiches mal dessinées et peu accentuées de ce lac intéressant.

Le 20 août 1890, des seiches énormes ont eu lieu sur le Léman, causées par une perturbation atmosphérique extraordinaire à l'époque du cyclone de la Vallée de Joux. M. Philippe Plantamour et moi-même les avons étudiées et décrites.

En 1891, je constatai la difficulté d'appliquer la formule des seiches de Merian aux lacs compliqués; cette formule, excellente pour l'oscillation de l'eau dans un bassin à fond horizontal, devient insuffisante quand le fond est incliné ou accidenté par des irrégularités de la profondeur.

Le secours que je demandais aux mathématiciens m'a été accordé de la manière la plus excellente par un hydraulicien distingué, M. Paul du Boys, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées français, à Annecy. M. du Boys a repris la question *ab ovo*, est arrivé par d'autres voies

que Merian à une formule identique à la sienne pour l'oscillation de l'eau dans un bassin à fond horizontal ; puis en faisant intervenir des considérations nouvelles, il a donné à cette formule la forme :

$$t = \frac{1}{\sqrt{g}} \sum_{1}^{n} \frac{s_i}{\left(\frac{\sqrt{h_i} + \sqrt{h_{i+1}}}{2}\right)}$$

pour l'oscillation de l'eau dans un bassin à fond compliqué.

Nous avons, M. du Boys et moi-même, appliqué cette nouvelle formule à des cas concrets, Léman, lac de Zurich, Bodan, et l'avons trouvée parfaitement satisfaisante.

En 1890, l'étude scientifique du lac de Constance qui accompagnait l'établissement de la carte hydrographique de ce lac, a été complétée par l'étude des seiches. M. Ed. Sarasin a bien voulu mettre gracieusement à notre disposition son limnographe qui a été installé par M. le comte Eb. de Zeppelin-Ebersberg, et moi-même, successivement dans les stations de Bodman, Constanz et Kirchberg. Nous en avons obtenu des résultats d'un haut intérêt.

En 1891 et 1892, M. Ed. Sarasin a établi son limnographe sur le lac de Neuchâtel, dans les stations d'Yverdon et Neuchâtel ; il a obtenu des tracés fort instructifs des seiches mal marquées et peu développées de ce bassin, dont nous attendions des seiches plus brillantes. On verra plus loin quel parti positif on peut tirer de ce résultat presque négatif.

Cette rapide esquisse des recherches faites pendant les vingt dernières années sur le Léman et les autres lacs était nécessaire pour que nous puissions développer, sans avoir à revenir sans cesse sur l'histoire des expériences, la théorie des seiches en général, et son application spéciale aux seiches du Léman.

Bibliographie des seiches de 1870 à 1892. Nous allons donner, à ceux que cela peut intéresser, la bibliographie aussi complète que possible des seiches, à partir de 1870. Je n'y inscris que les travaux originaux.

1. *F.-A. Forel.* Première étude sur les seiches. Bull. S. V. S. N., XII, 213. Lausanne, 1873.

2. — Deuxième étude sur les seiches. Ibid., XIII, 510. 1875.
Extrait de ce mémoire. Arch. Genève, LIII, 281. 1875.

3. *F.-A. Forel.* Les seiches, vagues d'oscillation fixe des lacs. Ier discours.
Actes S. H. S. N. Andermatt. 157. 1875.
Annales chim. et phys., IX. Paris, 1876.
4. — Le limnimètre enregistreur de Morges.
Arch. Genève, LVI, 305. 1876.
5. — La formule des seiches. Ier mémoire.
Ibid., LVII. 278. 1876.
6. *J.-M. Ziegler* et *J. Caviezel.* Plemyrameter Beobachtungen im Silser-See.
Anhang zum Texte der topogr. Karte v. Engadin. Winterthur, 1876.
7. *Ph. Plantamour.* Notes sur quelques observations limnimétriques faites à Sécheron.
Arch. Genève, LVIII, 302. 1877.
8. *F.-A. Forel.* Essai monographique sur les seiches du Léman.
Ibid., LIX, 50. 1877.
9. *Ph. Plantamour.* Note sur la limnimétrie, à l'occasion du tremblement de terre du 8 octobre 1877.
Ibid., LX, 511. 1877.
10. *F.-A. Forel.* Contributions à la limnimétrie du Léman. IIe série, § XIV.
Bull. S. V. S. N., XV, 160. Lausanne, 1877.
11. — Les causes des seiches.
Arch. Genève, LXIII, 113 et 189. 1878.
12. — Les seiches des lacs et leurs causes.
Cptes R. Acad. Sc. Paris, LXXXVI, 1500. 1878.
13. — Seiches and earthquakes.
Nature, XVII, 281. London, 1878.
14. *Ph. Plantamour.* Le limnographe de Sécheron, près Genève.
Arch. Genève, LXIV, 318. 1878.
15. *E. Gautier.* The Seiches of the lake of Geneva.
Nature, XVIII, 100. London, 1878.
16. *F.-A. Forel.* Le Problème de l'Euripe.
Cpte R. Acad. Sc. Paris, LXXXIX, 859. 1879.
La Nature, VIII, I, 35. Paris, 1880.
17. — Les seiches, vagues d'oscillation fixe des lacs. IIe discours.
Actes S. H. S. N. Berne, 1879.
18. *Ph. Plantamour.* Seiche occasionnée par le cyclone du 20 février 1879.
Ibid., I, 335. 1879.
19. *Ed. Sarasin.* Limnimètre enregistreur transportable. Observations à la Tour-de-Peilz, près Vevey.
Ibid., II, 724. 1879.

20. *F.-A. Forel* et *J.-L. Soret*. Les seiches dicrotes.
Ibid., III, 5. 1880.

21. *F.-A. Forel*. Seiches et vibrations des lacs et de la mer.
Assoc. française pour l'avanc. des sciences. Montpellier.
Cptes R. VIIIe session, 493. Paris, 1880.

22. *E. Sarasin*. Tracés limnographiques dans diverses stations du Léman.
S. H. S. N., Brigue. Arch. Genève, IV, 383. 1880.

23. Ἀνδρέας Α. Μιαούλης. Περὶ τῆς Παλιρροίας τοῦ Εὐρίπου. Ἐν Ἀθήναις, 1882.

24. *H.-C. Russell*. (Sur les seiches du lac George, Australie.)
Anniversary address R. Soc. of N. S. W 6 May 1885, p. 13.

25. *F.-A. Forel*. La formule des seiches, IIe mémoire. (Les seiches du lac George, les seiches longitudinales du Léman.)
Arch. Genève, XIV, 203. 1885.

26. — Les seiches des lacs.
Le guide scientifique. Morlaix, 1886.
Trad. anglaise : Prof. C.-D. West, of the Sismological Society of Japan. Tokio. 1890.

27. *Ed. Sarasin*. Tracés limnographiques du lac de Zurich.
S. H. S. N., Genève. Arch. Genève, XVI, 210. 1886.

28. *O. Krümmel*. Zum Problem des Euripus.
Petermann's Mitth., 1888, XI, 331.

29. *S. Günther*. Von den rhythmischen Schwankungen des Spiegels geschlossener Meeresbecken.
Mitth. der K. K. Geograph. Ges., 497. Wien, 1888.

30. *F.-A. Forel*. Seiches du 20 août 1890.
Bull. S. V. S. N., XXVII, IV. 1891.
Arch. Genève, XXIV, 658. 1890.

31. *Ph. Plantamour*. Effets du cyclone du 19 août 1890 sur le lac.
Arch. Genève, XXV, 302. 1891.

32. *F.-A. Forel*. Note sur la formule des seiches.
Bull. S. V. S. N., XXVII, XX. 1891.
Arch. Genève, XXV, 599. 1891.

33. *P. du Boys*. Sur le mouvement de balancement rythmé de l'eau des lacs (seiches).
Cptes R. Acad. Sc. Paris, CXII, 1202. 1891.

34. — Essai théorique sur les seiches, avec appendice par F.-A. Forel.
Arch. Genève, XXV, 628. 1891.

35. *Ed. Sarasin*. Remarques sur les seiches binodales, à propos de l'essai théorique de M. du Boys.
Arch. Genève, XXVI, 81. 1891.

Parmi les traités généraux qui, dans les dernières années, ont étudié les seiches, je citerai :

J. Hann. Allgemeine Erdkunde, p. 178. Prag, 1881.

S. Günther. Lehrbuch der Geophysik, II, 373. Stuttgart, 1885.

O. Krümmel. Handbuch der Ozeanographie, II, 137. Stuttgart, 1887.

LES VAGUES D'OSCILLATION FIXE DES BASSINS LIMITÉS.

J'ai publié sur les seiches un grand nombre de mémoires, à mesure que l'observation et la théorie se développaient ; plusieurs physiciens, mes collègues et mes amis, se sont intéressés à ces recherches et ont élucidé la question par leurs études théoriques et expérimentales ; ces travaux se corrigeant et se complétant les uns les autres nous ont tous amenés plus près du but. Ce but est la synthèse dont je vais essayer de tracer ici les grands traits. Il reste encore beaucoup à faire pour que le phénomène soit expliqué dans tous ses détails, et pour que les faits spéciaux observables dans chaque station de chaque lac soient interprétés définitivement ; mais il semble que la théorie générale rend suffisamment compte de l'ensemble des faits d'expérience, et que l'hypothèse se rapproche heureusement de la vérification que l'on est en droit d'exiger.

Le fait de physique générale que je crois avoir démontré est le suivant : Le mouvement de balancement de l'eau, que nous observons tous les jours dans nos bassins de petites dimensions, verre à boire, cuvette ou baignoire, se manifeste aussi dans les bassins de dimensions gigantesques des lacs; il se traduit à l'observation par ce que nous appelons les seiches.

Je vais essayer de faire cette démonstration en étudiant le balancement de l'eau dans un bassin quelconque, et en en déterminant les lois; je retrouverai ces mêmes lois dans les seiches des lacs.

On peut mettre en mouvement de balancement le liquide contenu dans un bassin par deux méthodes, ou bien en portant un coup sur le liquide, ou bien en ébranlant le bassin [1]. Mais, dans les deux métho-

[1] Pour mes expériences faites dans des auges et bassins, j'ai employé les procédés suivants. Quand je voulais agir directement sur l'eau, je frappais l'eau avec une planche horizontale, de large surface, environ le quart de la superficie du

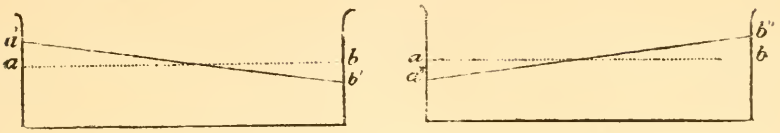
des, l'impulsion doit se rapprocher par ses allures de la vitesse du balancement de l'eau que l'on veut déterminer ; si le coup est trop brusque, ou s'il est trop lent, s'il est trop éloigné du rythme des vagues de balancement, celles-ci ne se développent pas. Que ce soit l'eau qui soit seule mise en mouvement, que ce soit l'ensemble du bassin et de l'eau qu'il contient qui soit ébranlé, il se produit en premier lieu une dénivellation locale ; l'eau est chassée d'une partie du vase et accumulée dans l'autre, la surface de l'eau s'affaisse en un point et se relève en un autre. Cette dénivellation cesse aussitôt que l'action perturbatrice est terminée, et l'eau tend à reprendre son niveau primitif. Mais par suite de l'impulsion acquise pendant ce retour à l'horizontalité, elle dépasse le niveau horizontal et il se produit une dénivellation en sens inverse. Celle-ci, elle aussi, n'est que temporaire et, de dénivellation positive en dénivellation négative, d'oscillation dans un sens, puis dans un autre, l'eau balance dans le bassin jusqu'à ce que, par les frottements contre les parois, et par les frottements intestins des molécules du liquide, le mouvement soit annulé, et le niveau horizontal soit repris. Il se produit donc une série d'oscillations pendulaires, d'amplitude décroissante, jusqu'à ce que l'équilibre soit enfin rétabli.

Il s'en suit que les vagues de balancement ne sont jamais isolées ; elles se présentent toujours sous la forme de séries, d'amplitude décroissante jusqu'à la valeur zéro. C'est l'une des caractéristiques essentielles de cet ordre de mouvements.

Le balancement de l'eau dans un bassin fermé peut être considéré comme étant un mouvement pendulaire simple ; la masse entière de l'eau se déplace en oscillant alternativement de chaque côté d'un plan vertical qui coupe le bassin en deux moitiés. Sur la ligne médiane l'eau subit simplement un mouvement oscillatoire horizontal ; des deux côtés de la ligne médiane le mouvement se complique, et l'eau tantôt amenée en excès, tantôt enlevée par le balancement pendulaire, subit des variations de hauteur, en outre du déplacement horizontal. Il en résulte que dans les deux moitiés du bassin séparées par la ligne médiane, la surface de l'eau présente des dénivellations rythmi-

bassin ; ou mieux encore, je plongeais dans l'eau, à l'une des extrémités du bassin, une planche horizontale tenue par un manche, et je la soulevais et l'abaissais suivant un rythme convenable. Quand je voulais agir sur le bassin, je le faisais basculer sur sa base, puis je le rétablissais dans la position primitive.

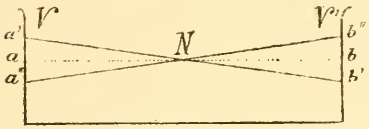
ques, qui tantôt s'élèvent au-dessus, tantôt s'abaissent au-dessous du niveau moyen.



(Fig. 45 et 46.) Positions extrêmes de l'eau dans le balancement uninodal.

Soit $a\,b$ le niveau moyen de l'eau; dans l'oscillation de balancement la surface de l'eau prendra alternativement les positions extrêmes $a'\,b'$ et $a''\,b''$, fig. 45 et 46. Dans la fig. 47 j'ai superposé les deux figures précédentes et je donne ainsi le schéma de l'oscillation complète du balancement uninodal.

Le balancement de l'eau appartient au type des oscillations fixes : tel que nous le considérons actuellement, c'est une oscillation fixe uninodale. D'après la nomenclature ordinaire j'appelle, dans un profil en long de bassin, ligne nodale, N, l'axe médian qui sépare le vase en deux moitiés, la ligne des deux côtés de laquelle la masse de l'eau oscille en mouvement pendulaire. J'appelle ventre d'oscillation, V et V', les deux régions du bassin où l'eau a son maximum de mouvement oscillatoire vertical.



(Fig. 47.) Schéma de l'oscillation uninodale de balancement.

Le mouvement de l'eau, dans le sens horizontal, a son maximum sur la ligne nodale, son minimum, égal à zéro, à l'extrémité terminale des ventres d'oscillation; dans le sens vertical, le maximum est à l'extrémité des ventres, le minimum, égal à zéro sur le nœud.

Dans les deux ventres d'oscillation, la direction du mouvement vertical est synchrône et opposée, c'est-à-dire que l'eau s'élève dans une des moitiés du bassin en même temps qu'elle s'abaisse dans l'autre, et vice-versa. Quant au mouvement horizontal, il est général, simultané et de même sens dans toute l'étendue de la masse liquide. L'un et l'autre, le mouvement horizontal et le mouvement vertical, sont alternatifs et changent de direction à la fin de chacune des phases de la période d'oscillation.

Dans un bassin de forme quelconque, l'on peut déterminer simultanément plusieurs mouvements de balancement simples qui oscillent en même temps et se superposent. Les principaux de ces mouvements

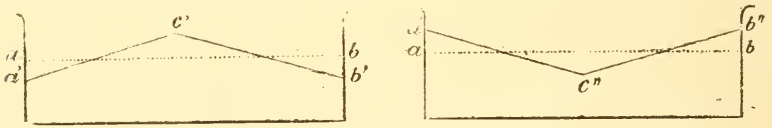
ont lieu suivant les deux diamètres principaux du bassin, diamètre longitudinal et diamètre transversal.

Je l'ai souvent constaté dans un aquarium rectangulaire : je mettais l'eau en balancement dans le sens d'une de ses faces, puis aussitôt après dans le sens de l'autre face ; les deux vagues de balancement suivaient chacune leur rythme, et ne semblaient pas gênées l'une par l'autre. Si le vase est assez compliqué pour présenter plusieurs bassins distincts, il peut y avoir des mouvements de balancement partiels, totalement indépendants les uns des autres.

De même qu'une corde tendue peut en vibrant donner plusieurs notes harmoniques, suivant qu'elle vibre dans toute sa longueur en ne formant qu'un ventre d'oscillation ou qu'elle vibre en longueurs partielles en formant deux, trois, quatre ou un plus grand nombre de ventres, de même aussi l'eau, dans son mouvement de balancement, peut présenter des vagues d'oscillation fixe de divers ordres.

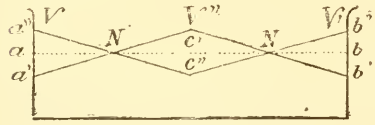
Le plus fréquent est celui que nous avons décrit jusqu'à présent et que nous désignons sous le nom de vagues d'oscillation fixe unino-dale ; vient ensuite en fréquence la vague binodale. Voici les caractères de ce second type.

Si au milieu de la longueur du bassin d'expérience j'imprime à l'eau un mouvement rythmique convenable en y faisant, par exemple, mouvoir verticalement un solide que je soulève et que j'enfonce alternativement, j'obtiens bientôt un mouvement de balancement partiel dans les deux moitiés du bassin, dont les phases sucessives sont



(fig. 48 et 49.) Positions extrêmes de l'eau dans le balancement binodal.

représentées dans les figures 48 et 49 ; $a\,b$ étant la surface de l'eau à l'état de repos, les lignes $a'\,c'\,b'$ et $a''\,c''\,b''$ sont la surface de l'eau au moment du maximum de dénivellation. Si je superpose ces deux dessins dans la figure 50, j'obtiens le schéma de l'oscillation binodale de balancement de l'eau : les points N et N' représentent les lignes nodales ou nœuds au nombre de deux, placés au premier quart et au troisième quart de la longueur totale du bassin ; les points V, V'



(Fig. 50.) Schéma de l'oscillation binodale de balancement.

et V'' représentent les trois nœuds d'oscillation, dont l'un V'' est médian, les deux autres V et V' sont terminaux.

Ce mouvement binodal peut être considéré comme formé par la juxtaposition de deux mouvements uninodaux. Du moment que le mouvement binodal a été établi, si l'on pouvait placer une cloison verticale dans le plan transversal au milieu du ventre médian, on verrait l'eau continuer à balancer, en mouvement uninodal, dans chacune des deux moitiés du bassin, avec le même rythme et les mêmes allures qu'elle a dans le mouvement binodal.

On peut concevoir la possibilité d'établissement de vagues d'oscillation fixe trinodales à 3 nœuds et 4 ventres, quadrinodales à 4 nœuds et 5 ventres, et en général multinodales avec un nombre de nœuds de n et de ventres $n + 1$ (1). Nous en signalerons l'existence probable dans les seiches des lacs. Dans tous les cas, il y a toujours un ventre d'oscillation à chaque extrémité du bassin, au point où la vague se réfléchit pour retourner en arrière. En effet les vagues d'oscillation fixe peuvent être considérées comme étant des séries de vagues d'oscillation progressive, arrêtées dans leur marche par une paroi contre laquelle elles se réfléchissent successivement ; elles retournent en arrière, chacune d'elles interférant avec les vagues qui lui succèdent et donnant un ventre aux points où les deux sommets homologues coïncident, un nœud où la coïncidence se fait entre deux sommets inverses.

La durée du mouvement du même type de vagues de balancement est toujours la même dans le même bassin et dans la même section verticale du bassin ; c'est là un des caractères essentiels des vagues d'oscillation fixe; on peut l'exprimer autrement en disant que c'est une oscillation pendulaire.

La durée des vagues de balancement est fonction des dimensions du bassin ; les expériences et déductions suivantes nous l'ont appris.

En 1870, j'ai étudié les lois principales de l'oscillation de balancement en expérimentant dans une auge du modèle des frères Weber (2). Ce bassin monté sur un cadre en bois de chêne, avec des parois latérales en verre, mesure 1.3^{m} de longueur, 40^{cm} de hauteur, 3^{cm} de largeur.

(1) En tenant compte du fait que les ventres terminaux ne sont que des demi-ventres, on pourrait dire aussi que le nombre des ventres est égal à celui des nœuds.

(2) Brüder *Weber*. Die Wellenlehre auf Experimente gegründet, p. 105, Atlas f. 12, Leipzig 1825.

Il est fixé sur un rouleau établi perpendiculairement à la longueur, sur lequel je puis faire balancer l'appareil. Pour déterminer des vagues de balancement, après avoir rempli d'eau l'auge jusqu'à une hauteur convenable, j'imprime à l'appareil une secousse en le faisant basculer sur le rouleau ; puis avec deux coins, je cale l'auge, et l'eau reste seule en mouvement de balancement. J'étudie les oscillations de l'eau en observant les poussières en suspension dans le liquide ; je mesure la durée totale d'une série de vagues de balancement, et, en divisant cette valeur par le nombre des oscillations, j'obtiens la durée moyenne d'une vague. [1]

Après avoir étudié la vague de balancement dans le bassin, avec toute sa longueur de 1.3m, j'ai obtenu les mêmes vagues dans des bassins plus courts en partageant l'auge à des distances convenables par un diaphragme vertical (un boyau de bœuf rempli de sable fin, bien tassé).

En faisant varier soit la profondeur de l'eau, soit la longueur utile de l'auge, j'ai obtenu les chiffres suivants qui expriment en secondes de temps la durée d'une vague entière de balancement de l'eau. J'appelle vague entière la série de mouvements qui ramène l'eau à la position du point de départ.

Profondeur d'eau.	Durée en secondes de la vague de balancement pour diverses longueurs du bassin (en millimètres).						
	*325*mm	*430*	*570*	*669*	*810*	*945*	*1300*mm
5cm	1.2 sec	1.3	1.7	1.9	2.25	2.60	3.65 sec
10	0.67	1.1	1.2	1.3	1.65	1.85	2.56
15	0.6	0.8	1.0	1.1	1.3	1.55	2.20
20	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.3	1.95
25	0.6	0.7	0.85	0.9	1.0	1.2	1.80
30	0.6	—	—	—	—	1.2	1.67
35	—	—	—	—	—	—	1.60

De ces chiffres et de nombreuses expériences accessoires, pour le

[1] Le mouvement d'oscillation était encore parfaitement constatable dans mon auge jusqu'à la 10e vague, quand la profondeur d'eau n'était que de 5cm, jusqu'à la 20e vague et plus quand l'eau dépassait 20cm de profondeur. La durée de la vague est donc relativement très exacte. S'il y a des irrégularités dans les courbes que l'on peut établir d'après les chiffres de mon tableau, elles proviennent de la mesure de la profondeur de l'eau, ou de la longueur du bassin, mesures pour lesquelles j'aurais pu prendre plus de soin. Je n'en ai pas senti le besoin pour la mise en évidence des lois très simples que j'avais à formuler.

détail desquelles je renvoie à ma Première étude sur les seiches [1], j'ai tiré les lois de l'oscillation fixe applicables au phénomène des seiches.

Tous les faits et lois que j'expose ici s'appliquent au mouvement de balancement simple ou vague d'oscillation fixe uninodale.

I. Dans les mêmes conditions de longueur et de profondeur, la durée de la vague de balancement est toujours la même, quelle que soit la hauteur de la vague, ou l'amplitude du mouvement.

Cette loi, qui rapproche l'oscillation fixe de l'eau des mouvements pendulaires, résulte de l'ensemble des observations et expériences.

II. Dans les mêmes conditions de profondeur d'eau, la durée de la vague de balancement augmente à mesure que la longueur du bassin augmente.

Pour une profondeur d'eau de 5^{cm} la durée de la vague est :

de 1.2^{sec} si le basssin a 32^{cm} de longueur
3.6 — 130 —

III. Dans les mêmes conditions de longueur du bassin, la durée de la vague de balancement augmente à mesure que la profondeur d'eau diminue.

Pour une longueur du bassin de 1.30^{m}, la durée de la vague est :

de 3.65^{sec} si l'eau a 5^{cm} de profondeur
1.60 — 35 —

L'influence du manque de profondeur d'eau se fait sentir jusqu'à une certaine limite, au-delà de laquelle elle n'apparaît plus dans mes expériences. C'est ainsi que pour une longueur de bassin de 32^{cm}, à partir et au-dessus de 15^{cm} de profondeur d'eau, la durée de la vague reste constante ; pour une longueur de bassin de 43^{cm}, c'est à partir de 20^{cm} de profondeur ; pour une longueur de 94^{cm} c'est à partir de 25^{cm}. Cette limite est par une profondeur d'autant moins grande que la longueur du bassin est plus faible.

Ces lois II et III qui se déduisent des valeurs du tableau de la page 70 se résument dans la phrase : l'oscillation fixe est d'autant plus lente que le bassin est plus long et moins profond, ou encore, la durée de l'oscillation fixe est fonction directe de la longueur du bassin, fonction inverse de la profondeur.

IV. Pour la même longueur du bassin la durée de la va-

[1] (Loc. cit. p. 62. n° 1.)

gue est légèrement ralentie si le plancher, au lieu d'être horizontal, est incliné, si la profondeur d'eau, au lieu d'être la même sur toute la longueur, est différente aux deux extrémités du bassin.

Cela résulte de l'expérience suivante : J'ai mis dans l'auge une certaine quantité d'eau, et après avoir mesuré la durée de la vague lorsque le fond était horizontal, j'ai incliné le bassin en continuant à mesurer la vague de balancement. La différence n'est pas très marquée, mais elle est incontestable ; elle ne se manifeste que lorsque la différence de profondeur est forte.

Profondeur de l'eau aux deux extrémités.		Durée de la vague de balancement.
50mm	50mm	3.6 sec
70	30	3.6
91	9	3.8

V. Pour une même impulsion, dans une même longueur du bassin, la hauteur de la vague est plus forte lorsque la profondeur d'eau est moindre.

Cette loi résulte de l'expérience suivante : Je fixe mon auge dans une position déterminée, et je l'organise de telle manière que l'impulsion donnée soit de même intensité ; puis je mesure la hauteur de la vague de balancement au-dessus du niveau de l'eau tranquille, en ayant soin de mesurer toujours la même vague de la série (j'ai choisi la 2e vague). J'ai répété cette expérience pour diverses profondeurs d'eau et j'ai trouvé :

Hauteur de la 2e vague par 5cm de profondeur d'eau 9mm
— — 20 — 6

VI. Dans un bassin dont le fond est incliné, la hauteur de la vague est plus forte à l'extrémité la moins profonde moins forte à l'extrémité la plus profonde.

L'expérience suivante m'a indiqué cette loi. Par une profondeur moyenne d'eau de 5cm, j'ai incliné le plancher du bassin de manière à ce qu'il y eût à l'une des extrémités 91mm de profondeur d'eau, à l'autre 9mm. J'ai mesuré la hauteur de la première vague à son retour, à 12cm de la paroi terminale, après avoir donné des impulsions de même intensité. J'ai obtenu :

par 85mm de profondeur 7mm de hauteur de vague.
— 15 — — 11 — — —

VII. Dans un bassin de profondeur uniforme, mais dont la largeur est inégale, la hauteur de la vague est plus

forte dans la partie la plus étroite que dans la partie la plus large. L'expérience suivante prouve la justesse de cette loi. Dans un *aquarium*, bassin rectangulaire de 60^{cm} de longueur sur 30^{cm} de largeur, que j'ai rempli d'eau jusqu'à 10, ou 15, ou 20^{cm} de profondeur, je fixe une lame de verre verticale qui partage à peu près en diagonale le champ d'eau, de telle manière que les deux bassins ainsi séparés ont une largeur de 24^{cm} au côté le plus large, 6^{cm} à l'autre. La longueur et la profondeur de l'eau étant les mêmes dans les deux bassins, la durée de l'oscillation de balancement y est aussi la même; l'eau oscille simultanément dans les deux bassins partiels si l'aquarium dans son ensemble reçoit une impulsion. Mais la vague se relève notablement plus haut dans la partie étroite que dans la partie large de chaque bassin, ce que l'on voit manifestement à travers la lame de verre.

VIII. Le mouvement d'oscillation de balancement est simultané et de même direction dans toute l'étendue du bassin. Sa direction change simultanément de direction dans toute la masse de l'eau.

Cette loi exprime le caractère essentiel de l'oscillation de balancement de l'eau.

IX. La densité du liquide n'a pas d'influence sur la durée de la vague de balancement. Dans le même vase et avec la même profondeur de liquide, j'ai fait successivement balancer du mercure, densité 13.59, et de l'alcool absolu, densité 0.75, et j'ai trouvé exactement la même durée d'oscillation. (1)

Il ne suffisait pas d'avoir reconnu que la vague uninodale d'oscillation fixe est fonction directe de la longueur du bassin et fonction inverse de la profondeur ; il était nécessaire de déterminer quelles étaient ces fonctions. Les recherches et considérations suivantes nous ont appris la formule applicable aux seiches.

Le Dr Fréd. Guthrie, professeur à l'Ecole des Mines de Londres, a étudié en 1875 le mouvement des vagues d'oscillation fixe dans des bassins d'expérience, et est arrivé à rapporter la durée de ces vagues à celle des oscillations du pendule. Mais il ne s'est occupé que des

(1) Cette loi aurait pu être réduite théoriquement. Aussi bien la masse du liquide à mouvoir que son poids, c'est-à-dire la force qui le fait mouvoir, sont l'un et l'autre proportionnels à la densité. Le rapport étant le même, la résultante doit être identique.

cas où le bassin est assez profond pour que les variations de la profondeur n'influencent plus la durée des vagues [1]. Il a reconnu, comme moi, que, dans le mouvement de balancement de l'eau, la profondeur a une très grande influence sur la durée de la vague tant que le bassin est peu profond ; à mesure que la profondeur augmente, cette action diminue, et lorsque la profondeur arrive à être une fraction importante de la longueur, cette action est absolument nulle. M. Guthrie ne s'est attaqué qu'aux cas où l'influence de la profondeur peut être négligée et il a reconnu :

1° *Que les oscillations circulaires binodales dans un bassin circulaire sont isochrones avec celles d'un pendule dont la longueur est égale au rayon du bassin.* [2]

2° *Que les oscillations binodales dans un bassin rectangulaire sont égales en durée à celles d'un pendule dont la longueur est* $\frac{2}{\pi}$ *de la longueur du bassin.*

3° *Que la durée des oscillations uninodales dans un bassin rectangulaire est à celle des oscillations binodales du même bassin comme* $\sqrt{2} : 1$.

D'après ces lois du Dr Guthrie, la formule des vagues d'oscillation fixe dans un des bassins de profondeur infinie serait, t étant la durée d'une demi-oscillation de l'eau, et l la longueur du bassin (ou son diamètre dans les bassins circulaires) ; g étant le coefficient de la pesanteur :

Oscillations binodales circulaires dans un bassin circulaire :

$$t = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{l}{2g}} \qquad (1)$$

Oscillations binodales longitudinales dans un bassin rectangulaire :

$$t = \sqrt{\frac{\pi l}{2g}} \qquad (2)$$

[1] *Frederick Guthrie.* On stationary liquid waves, *Proceed. of the phys. Society,* vol. I, London, 1875.

[2] Dans l'énoncé de ces lois, le Dr Guthrie a considéré la durée de l'oscillation de l'eau comme étant une oscillation entière, à savoir le temps nécessaire pour ramener à son niveau l'eau qui s'est abaissée, puis relevée, tandis que pour le pendule il a considéré la demi-oscillation, à savoir le temps pendant lequel le mobile se rend de droite à gauche ou de gauche à droite.

Oscillations uninodales longitudinales dans un bassin rectangulaire :

$$t = \sqrt{\frac{\pi l}{g}} \qquad (3)$$

C'est cette dernière formule (3) qui serait applicable aux seiches, si les lacs étaient assez profonds pour que les lois de M. Guthrie pussent leur être attribuées. Mais la profondeur des lacs est trop faible proportionnellement à leur longueur pour que son influence puisse être négligée. En effet, l'action de la profondeur n'est négligeable que dans des bassins dont la profondeur est à la longueur dans un rapport de 1 : 2 ou moins encore, et dans les lacs suisses que j'ai étudiés au point de vue des seiches, ce rapport était de 1 : 360 à 1 : 53. (1)

Ces formules de M. Guthrie qui ne font pas intervenir la profondeur ne sont donc pas utilisables pour le calcul des seiches.

Je dois à l'obligeance du Dr C. Von der Mühl, alors professeur à Leipzig, aujourd'hui à Bâle, la communication d'un mémoire (2) de son grand-oncle, J.-Rud. Merian, de Bâle, qui a étudié par l'analyse mathématique les mouvements des liquides dans les bassins. Partant des équations différentielles de la mécanique analytique de Lagrange, qui expriment d'une part la pression exercée de différents côtés sur un des éléments d'un liquide contenu dans un vase, et d'une autre part la vitesse de cet élément suivant trois axes à angle droit, Merian est arrivé entre autres (page 31) à une équation :

$$t = \sqrt{\frac{\pi l}{g}} \left(\frac{e^{\pi \frac{h}{l}} + e^{-\pi \frac{h}{l}}}{e^{\pi \frac{h}{l}} - e^{-\pi \frac{h}{l}}} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (4)$$

(1) Le lac de Joux est celui des lacs suisses dans lequel ce rapport est le plus faible ; sa longueur est de 9km, et sa profondeur maximale de 33m, le rapport est 1 : 273. Le lac de Brienz est au contraire, parmi les grands lacs subalpins, le plus profond, 261m, par rapport à sa longueur 13.7km, le rapport étant 1 : 53. Quant au Léman, sa longueur suivant l'axe courbe étant 72.3km et sa profondeur 310m, le rapport est 1 : 233.

(2) *J.-R. Merian.* Ueber die Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten in Gefässen. Abhandlung von Dr J.-Rud. Merian. Basel, 1828. — M. Von der Mühl a publié, en 1885, une seconde édition du mémoire de Merian, en lui donnant une forme qui tient compte des progrès faits depuis lors dans l'analyse mathématique. Mathematische Annalen. XXVII, 575. Leipzig, 1885.

qui exprime la durée t de l'oscillation simple de l'eau en fonction de la longueur l et de la profondeur h du bassin.

« Si le bassin, dit Merian, était de profondeur infinie ($h = \infty$), on aurait

$$t = \sqrt{\frac{\pi l}{g}} \qquad (5)$$

Autrement dit : *La durée d'une oscillation de l'eau serait à celle du pendule de longueur 1 comme 1 : $\sqrt{\pi}$* [1]. Si h n'est pas infini, cette valeur doit être multipliée par le terme entre parenthèse (4). Autrement dit : *La durée de l'oscillation est ralentie par le peu de profondeur de l'eau et cela d'autant plus que la profondeur est moins forte.* »

Si les seiches sont bien, comme je le suppose, des mouvements d'oscillation fixe de l'eau, cette formule doit exprimer leur rythme. C'est ce que nous allons vérifier.

Tout d'abord j'ai appliqué cette formule (4) aux expériences que j'avais faites sur le balancement de l'eau dans un bassin rectangulaire à parois planes et à profondeur régulière.

La longueur du bassin étant de 1.30^{m}, l'expérience m'avait donné :

Pour une profondeur de 35^{cm} une durée d'oscillation simple de 0.80 seconde ;

Pour une profondeur de 5^{cm} une durée d'oscillation de 1.82^{sec}. [2]

La formule de Merian (4) appliquée à ces données arrive à une durée de 0.78^{sec} pour le premier cas, de 1.86^{sec}, pour le deuxième cas. La différence est assez faible pour que je puisse l'attribuer à des erreurs d'expérimentation et je dois admettre que la formule s'applique bien à l'oscillation, soit balancement de l'eau, dans un bassin régulier.

En sera-t-il de même dans un bassin irrégulier ?

Dans mes études expérimentales, j'ai essayé d'élucider l'influence de l'inclinaison du fond du bassin. Après avoir rempli d'eau l'auge jusqu'à une hauteur donnée, et avoir mesuré le nombre des oscillations lorsque le fond était horizontal, j'ai incliné le bassin de manière à ce que la profondeur de l'eau fût double à l'une des extrémités de

[1] C'est la même formule à laquelle est arrivé le Dr Guthrie, formule (3).

[2] Voir mon tableau de la page 70. Dans ce tableau, la durée des vagues de balancement est celle de la vague entière. Ici je ne fais intervenir que la demi-oscillation. Les valeurs de mon tableau doivent donc être divisées par 2.

ce qu'elle était à l'autre ; j'ai constaté que la durée des oscillations n'était pas modifiée d'une manière appréciable. En poussant l'expérience à l'extrême et en faisant la profondeur dix fois plus forte à l'une des extrémités qu'à l'autre, j'ai reconnu que la durée des oscillations était augmentée il est vrai, mais l'était d'une quantité si faible, $^1/_{20}$ environ, que je puis dire qu'elle n'est pas notablement modifiée.

J'ai donc pu admettre provisoirement que l'inclinaison du fond ne modifie pas notablement la durée de l'oscillation, que celle-ci est par conséquent fonction de la profondeur moyenne et non des profondeurs extrêmes.

Dans le cas où le fond, au lieu d'être régulier, deviendrait inégal et irrégulier, peut-on admettre que la profondeur moyenne réglerait encore la durée des oscillations de l'eau ? L'analogie permet de le supposer, pour une première recherche.

J'ai donc essayé d'appliquer la formule de Merian au bassin irrégulier, incliné et inégal des lacs et de chercher si les valeurs qu'elle donnerait pourraient s'appliquer convenablement aux seiches.

Mais là je me trouvais en présence d'une inconnue : la profondeur moyenne des lacs. Etant donnés les sondages plus ou moins nombreux dont on dispose pour le relief d'un lac, y a-t-il possibilité d'en déduire la profondeur moyenne de ce lac ? J'aurais pu l'essayer ; j'ai préféré suivre une autre marche.

J'ai transformé l'équation de Merian, pour faciliter les calculs, en

$$t = \sqrt{\frac{\pi l}{g}} \left(\frac{e^{\frac{2\pi h}{l}} + 1}{e^{\frac{2\pi h}{l}} - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (6)$$

puis j'en ai déduit la valeur de h, profondeur moyenne du lac.

$$h = \frac{l}{\pi} \left(\frac{\log. \sqrt{\dfrac{t^2 + \frac{\pi l}{g}}{t^2 - \frac{\pi l}{g}}}}{\log. e} \right) \qquad (7)$$

De cette manière, je puis, ou bien chercher la durée des seiches étant connues la longueur et la profondeur moyenne du lac, ou bien calculer la profondeur moyenne étant connues la longueur du bassin

et la durée des seiches. J'ai exécuté quelques-uns de ces calculs en utilisant les données que je possède et je les ai trouvés parfaitement réalisables. Nous en donnerons plus loin quelques exemples.

Les résultats de ces calculs correspondaient assez suffisamment aux faits connus pour que j'aie pu admettre provisoirement que la formule de Merian s'applique très convenablement aux lacs ; à l'aide de cette formule l'on pourrait donc calculer la durée des seiches des lacs dont le relief est connu, apprécier la profondeur moyenne d'un lac par l'étude de la durée des seiches.

Je dois à sir William Thomson, professeur à l'Université de Glasgow, aujourd'hui lord Kelvin, une simplification très importante de la formule de Merian, qui en rend l'application plus facile et plus pratique. Dans une lettre du 6 octobre 1876, il me dit entre autres :

« Dans le cas où la longueur d'un bassin est très considérable par rapport à la profondeur, de telle manière que $\frac{h}{l}$ soit une très petite fraction, la formule de Merian devient approximativement :

$$t = \frac{\pi l}{g}\left(\frac{1 + \frac{1}{2}\left(\pi\frac{h}{l}\right)^2}{\pi\frac{h}{l}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

ou

$$t = \frac{l}{\sqrt{g h}}\left(1 + \frac{1}{4}\left(\pi\frac{h}{l}\right)^2\right)$$

Il est probable que, dans les lacs où vous avez à appliquer la formule, les conditions sont telles que le terme $\frac{1}{4}\left(\pi\frac{h}{l}\right)^2$ peut être négligé sans inconvénient, de sorte qu'en définitive vous auriez simplement

$$t = \frac{l}{\sqrt{g h}} \qquad (8)$$

ce qui peut se traduire ainsi : *La demi-période d'une oscillation de seiche est le temps qui serait employé pour traverser la longueur du lac avec la vitesse qu'acquerrait un corps tombant d'une hauteur égale à la moitié de la profondeur moyenne du lac.* »

J'ai aussitôt essayé d'appliquer cette formule (8) à quelques calculs de seiches, et, en la comparant avec les valeurs que me donnait la

formule complète de Merian, j'ai reconnu que l'écart entre les résultats des deux formules est insignifiant et en tous les cas très loin de l'importance des erreurs que l'on est exposé à faire en mesurant la durée des seiches.

Cette formule simplifiée est donc parfaitement applicable à l'étude des seiches, dans des lacs relativement peu profonds comme le sont nos lacs suisses, et, comme elle est beaucoup plus simple que celle de Merian, elle devra lui être préférée.

L'on peut de cette formule (8) tirer :

$$h = \frac{l^2}{g t^2} \qquad (9)$$

ce qui permet de calculer la profondeur moyenne d'un lac, étant connues la longueur de ce lac et la durée de ses seiches,

ou encore

$$l = t \sqrt{g h} \qquad (10)$$

formule qui serait applicable à la résolution de quelques cas spéciaux. [1]

L'on peut enfin développer cette même formule (8) en disant : *que la durée des seiches est proportionnelle à la longueur des lacs et inversement proportionnelle à la racine carrée de leur profondeur moyenne.*

En possession de cette formule, je l'ai appliquée au calcul des seiches d'après les données que j'avais alors, à savoir : la durée des seiches de la plupart des lacs suisses, mesurées par quelques observations plémyramétriques, la longueur des lacs d'après la carte au 1 : 100 000e, enfin la profondeur des lacs (pour la plupart des lacs suisses nous ne connaissions à cette époque que la profondeur maximale). J'ai constaté que le calcul m'amenait à des résultats assez satisfaisants pour que j'aie pu avancer que la formule de Merian était applicable aux rapports entre la durée des seiches et les dimensions des lacs.

Je ne répète pas ici tous ces calculs, parce que les données étaient entachées de trop grosses erreurs, et que les résultats étaient purement provisoires. J'en citerai cependant deux qui m'ont amené à des faits intéressants.

[1] Dans l'utilisation de ces formules, g étant le coefficient de la pesanteur 9.8088m, l et h la longueur et la profondeur du bassin, doivent être exprimées en mètres, et t, la durée de la demi-oscillation de balancement, en secondes de temps.

Le premier se rapporte au lac de Walenstadt. A cette époque (1876) la carte hydrographique de ce lac n'était pas encore levée ; les renseignements les plus précis sur la profondeur du lac provenaient des opérations du sauvetage du bateau à vapeur *le Dauphin*, naufragé en 1851 ; d'après le dire des ingénieurs, le bateau gisait sur le fond sous 114^m d'eau ; le fond étant plat autour du bateau, ils admettaient que c'était la profondeur maximale du lac. Pour la longueur du lac, la carte fédérale donnait 15.5^{km}. Quant aux seiches, je les avais mesurées le 18 septembre 1874 ; elles étaient, ce jour-là, très belles et très régulières ; leur durée moyenne de 871 secondes me paraissait fort bien assurée.

Or en appliquant la formule (7), je tirai de la longueur du lac et de la durée des seiches une valeur de h, profondeur moyenne, de 125^m. Cette valeur était incompatible avec une profondeur maximale de 114^m. Ou bien les ingénieurs du *Dauphin* avait fait erreur, ou bien ma mesure des seiches était fausse, ou bien encore la formule employée ne s'appliquait pas à ces faits. Il fallait donc vérifier les données. Le 3 octobre 1876, je me suis rendu à Wesen, et, armé de la sonde, j'ai cherché quelle est la profondeur maximale du lac. J'ai trouvé devant Quinten jusqu'à 138^m ; depuis lors, en 1880, M. l'ingénieur Manuel, en faisant le lever de la carte hydrographique, a constaté jusqu'à 151^m de profondeur maximale. Cela étant, la profondeur moyenne pouvait être 125^m, et la formule était justifiée.

Le second cas se rapporte à un lac fort éloigné de nous. M. H.-C. Russell, astronome royal à Sydney, fit établir en 1885 un limnographe sur le lac George, lac de montagne, situé dans l'intérieur des terres, derrière le Gourock-Range, dans la province de Murray, Nouvelles Galles du Sud, longit. E. 149°25′, lat. S. 35°7′, altitude 600^m. Les dimensions de ce lac sont : longueur 18 milles anglais (29^{km}), largeur 5 milles (8^{km}) profondeur 15 à 20 pieds (4.6 à 6.1^m). Le limnographe commença à fonctionner le 18 février 1885, et aussitôt le crayon de l'enregistreur dessina des oscillations rythmiques qui intéressèrent au plus haut degré les observateurs. Ils constatèrent bientôt tous les détails d'allures que nous avons étudiés sur les seiches du Léman (constance de la durée, variabilité de la hauteur des oscillations, au maximum 13^{cm}, relations avec les orages, distinction entre les seiches uninodales et binodales). Je n'analyse pas ici cette partie du rapport qui répéterait des faits depuis longtemps établis par l'étude de notre lac.

Mais ce que j'y trouve de plus intéressant, c'est ce qui se rapporte à la durée des seiches. De la mesure de 33 seiches bien régulières, M. Russell conclut à une durée de 131 minutes pour l'oscillation entière des seiches du lac George. Or cette durée est énorme; elle atteint presque le double de ce que nous avons sur le Léman où la grande seiche uninodale a une durée de 73 minutes, quoique notre lac, avec ses 72^{km} de longueur sur son axe courbe, soit de plus du double de la longueur du lac George qui n'a que 29^{km}.

La très faible profondeur du lac George suffira-t-elle à expliquer un ralentissement aussi marqué du mouvement des seiches? Appliquons notre formule :

$$h = \frac{l^2}{g\,t^2}$$

$l = 28\,962^{m}$.

t la durée d'une demi-oscillation de seiche $= 3\,930^{sec}$

donc $h = 5.536^{m}$, soit 18.1 pieds anglais.

M. Russell nous dit que le lac George a actuellement 15 à 20 pieds de profondeur. Le calcul des seiches me donne pour cette profondeur 18 pieds. La vérification est aussi brillante que possible.

Ainsi donc j'étais autorisé par l'expérience à admettre que la formule

$$t = \frac{l}{\sqrt{g\,h}}$$

est applicable aussi bien à l'oscillation fixe uninodale d'un bassin d'expérimentation qu'aux mouvements des seiches des lacs.

Il s'agissait toutefois de définir ce que doit représenter h dans un bassin irrégulier, à fond inégal et compliqué, comme le sont les bassins d'eau dans la nature. h doit être la profondeur moyenne; mais qu'est-ce, en pareil cas, que la profondeur moyenne? Est-ce le volume total de la masse d'eau divisé par la superficie? Est-ce la profondeur moyenne dans le plan vertical passant par l'axe du bassin suivant lequel l'eau balance?

On peut comprendre avec quel intérêt j'attendais l'achèvement de la carte hydrographique du Léman qui devait permettre de juger cette question. Je connaissais exactement la durée des seiches uninodales du lac; je connaissais la longueur de l'axe du bassin; quant à la profondeur moyenne, je n'ai pu la calculer que lorsque j'ai eu à disposition la carte hydrographique du lac. Ces calculs ont été exécutés en

1890 et ont donné pour la profondeur moyenne générale du Léman 152.7^{m}, pour la profondeur moyenne sur l'axe courbe du lac 167^{m}. D'une autre part l'application de la formule de Merian m'amenait à une valeur de $h = 112.4^{m}$. Il y avait là une discordance grave. (1)

J'ai alors demandé secours aux mathématiciens, et la question ayant été posée à M. Paul du Boys, ingénieur en chef des ponts et chaussées du département de la Haute-Savoie, à Annecy, cet hydraulicien distingué a repris le problème et l'a résolu de la manière la plus satisfaisante. (2)

Tout d'abord M. du Boys a donné une nouvelle démonstration de la formule

$$t = \frac{l}{\sqrt{gh}}$$

dans le cas où le fond du bassin est horizontal, en se fondant sur les lois de l'hydraulique. Cette confirmation nous a été, on le comprend, précieuse.

Puis il a abordé le cas où la profondeur du bassin est irrégulière. Je donne ici l'analyse de son mémoire, telle que M. du Boys l'a présentée, lui-même, à l'Académie des sciences de Paris. (3)

« Les équations différentielles du mouvement oscillatoire peuvent être posées directement ; mais il ne paraît pas possible d'en tirer parti quand la profondeur varie d'un point à l'autre du profil du bassin.

» Pour tourner cette difficulté, on peut identifier le mouvement de balancement avec le mouvement de propagation d'une onde solitaire de longueur double de la longueur du bassin et enfermée dans le dit bassin, de telle sorte que les deux extrémités de l'onde, après réflexion contre les parois extrêmes, se rejoignent et marchent ensemble. Alors deux points de l'onde interfèrent en chaque point du profil du bassin, l'un des points de l'onde marchant dans un sens, l'autre marchant en sens contraire.

» La demi-période du mouvement de balancement, c'est-à-dire le temps t pendant lequel l'eau monte ou descend en un point du bassin, est égal au temps que le sommet de l'onde met à parcourir la lon-

(1) Procès-verbaux, S. V. S. N. 1er avril 1891.

(2) *Paul du Boys*. Essai théorique sur les seiches. Archives de Genève, XXV, 628, 1891.

(3) C. R. Acad. de Paris, CXII, 1202, 1891.

gueur l du bassin. Or la vitesse ω de propagation de l'onde est, pour une intumescence de très faible hauteur, en un point où la profondeur est h,

$$\omega = \sqrt{gh} \qquad (11)$$

» Dès lors, si s est l'abscisse de ce point à partir de l'origine du bassin, on peut écrire :

$$t = \int_0^l \frac{ds}{\omega} = \int_0^l \frac{ds}{\sqrt{gh}} \qquad (12)$$

h étant une fonction de s.

» Cette formule pourra être appliquée à un bassin à fond irrégulier, en décomposant le profil en sections de longueur s_i correspondant à des profondeurs extrêmes h_i et h_{i+1}, entre lesquelles le profil du fond sera assimilé à une ligne droite ; la valeur de t prendra alors la forme :

$$t = \frac{2}{\sqrt{g}} \sum \frac{s_i}{\sqrt{h_i} + \sqrt{h_{i+1}}} \qquad (13)$$

» En appliquant cette méthode à un profil que l'on obtient en rectifiant la ligne du thalweg du Léman, on trouve des résultats qui s'écartent très peu de ceux de l'observation, sans qu'il y ait lieu de tenir compte des variations de profondeur dans les sections transversales du lac. »

Par conséquent, pour calculer pratiquement la durée t dans un bassin quelconque, il faudra décomposer le profil en long suivant l'axe de ce bassin en une série d'éléments, tels que chacun d'eux puisse être considéré comme ayant un fond rectiligne et faire la somme des temps employés pour le parcours de chacun de ces éléments. Pour chaque élément, le temps employé s'obtiendra en divisant la longueur de l'élément par la moyenne arithmétique des racines carrées des profondeurs aux deux extrémités de l'élément, cette moyenne arithmétique étant multipliée par $\sqrt{g}$.

La formule de M. P. du Boys, représentant la durée de la demi-oscillation uninodale de balancement dans un bassin de fond irrégulier, est donc :

$$\frac{T}{2} = \frac{4}{\sqrt{g}} \sum_1^n \frac{s_i}{\left(\frac{\sqrt{h_i} + \sqrt{h_{i+1}}}{2}\right)} \qquad (14)$$

n étant le nombre des éléments.

M. du Boys s'est ensuite occupé de la position des nœuds de balancement. Je reprends son résumé :

« Pour que le mouvement donne lieu à un nœud, c'est-à-dire à un niveau invariable en un point fixe, il faudra que le profil de l'onde génératrice du mouvement, supposée se propageant dans un canal à fond horizontal, soit symétrique par rapport à la verticale passant par son sommet, et que les deux demi-ondes, en avant et en arrière du sommet, soient elles-mêmes symétriques par rapport à leur milieu.

» Dans ce cas, deux points de l'onde, distants d'une longueur telle que cet espace soit parcouru dans un temps égal à t, auront des ordonnées dont la somme sera constante. Deux points ainsi définis interfèreront toujours en un point du bassin tel que, pour arriver de ce point à l'une des extrémités du bassin, il faille un temps $\frac{t}{2}$.

» Ce point sera un nœud ; car si l'onde se déforme en passant sur des profondeurs variables, en un point donné du bassin la hauteur de l'intumescence reste toujours proportionnelle à la somme des intumescences des deux points correspondants de l'onde génératrice ; elle est donc constante pour ce point, qui réalise ainsi la condition caractéristique du nœud. »

Nous reviendrons sur le procédé pratique indiqué par M. du Boys pour trouver la position des nœuds, quand nous aurons à l'appliquer à nos seiches du Léman.

Pour ce qui regarde les vagues binodales d'oscillation de balancement (t'), M. du Boys les considère comme ayant une durée de la moitié des vagues uninodales (t).

$$\frac{t}{t'} = 2. \qquad (15)$$

M. le professeur Ch. Soret, de Genève, dans une communication inédite [1], est arrivé a un résultat un peu différent.

« La durée de l'oscillation des vagues uninodales étant donnée par la formule de Merian, pour l'oscillation des vagues binodales, il faut remplacer l par $\frac{l}{2}$, et si la profondeur est infinie :

$$h = \infty$$

on a $$t = \sqrt{\frac{\pi l}{g}}$$

[1] *Ch. Soret*, in litt : 27 juillet 1880.

$$t' = \sqrt{\frac{\pi l}{2g}}$$

$$\frac{t}{t'} = \sqrt{2} \qquad (16)$$

« Au contraire pour une profondeur tendant vers zéro, t et t' tendent vers l'infini, mais leur rapport tend vers une limite fixe dont il se rapproche d'autant plus que la profondeur est plus faible.

$$\frac{t}{t'} = \sqrt{2}\,\frac{e^{\frac{\pi h}{l}} + e^{\frac{-\pi h}{l}}}{\left(e^{\frac{2\pi h}{l}} + e^{\frac{-2\pi h}{l}}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

pour $h = 0$

$$\frac{t}{t'} = 2 \qquad (17)$$

« La durée des vagues binodales tendra donc à être la moitié de celle des vagues uninodales quand la profondeur du bassin diminuera vers 0. »

La durée de l'oscillation binodale serait donc, d'après cette interprétation de la formule de Merian par M. Soret, intermédiaire à la durée de l'oscillation uninodale divisée par $\sqrt{2}$ soit par 1.414, cas atteint pour une profondeur infinie, et à la moitié de ces uninodales, cas atteint pour une profondeur d'eau nulle. Elle serait donc intermédiaire entre 0.5 et 0.7 de la durée des uninodales, se rapprochant d'autant plus de la première valeur que la profondeur d'eau sera moindre.

— Voyons maintenant ce que nous dit l'expérience. Dans mon auge de 1.30^{m}, j'ai successivement déterminé, pour la même profondeur d'eau, le rapport $t : t'$ de la durée des uninodales et des binodales. Voici le résumé de plusieurs expériences, toutes concordantes :

Profondeur d'eau.	Rapport $t : t'$
10^{cm}	2.11
15	2.08
20	1.89
25	1.84
30	1.80

Quand la profondeur d'eau est faible, le rapport est supérieur à 2,

quand la profondeur est plus grande que 15 ou 20^{cm}, le rapport devient inférieur à 2.

L'expérience et la théorie ne sont donc pas d'accord sur ce point. Nous verrons plus tard ce que nous donneront les seiches.

Résumons ce paragraphe sur les vagues de balancement.

Ces vagues ne sont jamais isolées ; elles se présentent en séries de hauteur décroissante ; la durée de la vague est toujours la même pour le même type, quelle que soit la hauteur de la dénivellation.

Les vagues oscillent dans le sens des diamètres principaux du bassin. Il y a donc des vagues longitudinales et des vagues transversales. Il peut y avoir développement simultané de ces deux systèmes de vagues.

Les vagues se présentent sous la forme de vagues uninodales, de vagues binodales : ce sont les types principaux ; accidentellement il peut se développer des vagues plurinodales.

Il y a toujours un ventre à chaque extrémité du plan d'oscillation.

Dans l'uninodale, il y a deux ventres terminaux et un nœud médian.

Dans la binodale, il y a deux ventres terminaux et un ventre médian ; les deux nœuds sont aux quarts terminaux du plan d'oscillation

Il peut y avoir interférence de ces deux types.

La hauteur de la vague est à son maximum dans les ventres ; elle est nulle dans les nœuds.

Si le bassin est de profondeur inégale à ses extrémités, la hauteur de la vague est la plus forte dans le ventre terminal où l'eau est la moins profonde.

Les dénivellations positives et négatives devant se faire équilibre, il résulte de cette différence de hauteur des vagues, quand le fond est incliné, que les nœuds sont plus rapprochés de l'extrémité du bassin où l'eau est la moins profonde.

Si le bassin est de largeur inégale, la hauteur de la vague est la plus forte dans le ventre terminal où la largeur est la plus faible.

Le déplacement horizontal est maximal dans les nœuds ; il est nul dans les ventres.

Le mouvement vertical est synchrône et opposé dans deux ventres voisins ; c'est ainsi qu'il est opposé dans les deux ventres du type uninodal, opposé dans le ventre médian et chacun des ventres termi-

naux du type binodal, synchrône et de même sens dans les deux ventres terminaux de ce même type binodal.

Le mouvement horizontal est simultané et de même direction des deux côtés d'un nœud ; il est simultané et de direction opposée des deux côtés d'un ventre.

Enfin, dans un bassin régulier, la durée de l'oscillation est exprimée par la formule :

$$t = \frac{l}{\sqrt{gh}}$$

Dans un bassin irrégulier cette formule prend la forme que lui a donnée M. P. du Boys, (13) ou (14).

MÉTHODES D'OBSERVATION DES SEICHES

Après avoir ainsi étudié les caractères généraux de l'oscillation de balancement, telle qu'on l'observe dans les bassins d'expérimentation, nous allons rechercher ces caractères dans le phénomène naturel des seiches.

Les seiches se traduisent à notre observation par des dénivellations de l'eau du lac ; l'eau s'élève et s'abaisse alternativement au-dessus et au-dessous du niveau moyen. Ces mouvements étant relativement lents, ils échappent à la vue, et n'apparaissent pas à l'œil comme les oscillations rapides des vagues du vent. Nous n'avons pas encore trouvé le moyen d'observer les déplacements horizontaux, qui doivent se traduire par des courants extrêmement lents.

Pour étudier les seiches, nous avons mis en jeu diverses méthodes.

1° La plus simple, consiste à suivre sur une règle graduée (échelle limnimétrique) la hauteur de l'eau, à la noter de minute en minute, et à en figurer les variations sur un tableau graphique. Quand les seiches sont assez fortes, et que le lac n'est pas trop agité, cette méthode donne des résultats excellents.

Je puis citer les anciennes observations de Vaucher, celles de Yersin, et mes observations de janvier 1877, dans lesquelles j'ai démontré, par ce moyen, le synchronisme des seiches longitudinales uninodales dans diverses stations du Léman, et leur opposition de mouvement

dans les deux moitiés du lac, à Morges et Vevey d'une part, à Genève d'autre part. (1)

Nous pouvons, dans certaines circonstances favorables, étudier les dénivellations rapides du lac, en notant la direction des courants à l'entrée d'un étang, lagune ou port en relation avec le lac. Ayons un bassin en communication avec le lac par un canal étroit, lorsque l'eau s'élèvera accidentellement dans le lac, il se produira un courant d'entrée dans le bassin accessoire, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli entre les deux nappes d'eau ; lorsque l'eau du lac baissera, il se produira un courant de sortie hors du bassin accessoire.

Ces courants d'entrée et de sortie sont très sensibles dans le port de Morges, qui, outre sa large entrée, ouverte aux bateaux et barques, offre à son angle nord, près du quai, un goulet de 1.5^{m} de large, destiné à l'assainissement des parties les plus reculées du port ; ce goulet, placé dans un point fort commode pour l'observation, montre en temps de seiches des courants alternatifs d'entrée et de sortie, parfois très violents ; j'ai vu souvent l'eau s'y précipiter avec une vitesse d'un mètre par seconde. (2)

Ces mêmes courants alternatifs peuvent s'observer dans des circonstances favorables aux petits goulets, soit golérons, du port de Genève : quand le barrage mobile de la machine est fermé, et que le courant du Rhône est très faible, on voit, si les seiches sont fortes, pendant la seiche basse, l'eau sortir hors du port de Genève, en cheminant à contre sens, en remontant du port dans le lac. J'ai, dans deux occasions, été témoin de ce phénomène.

Des observations analogues ont été faites à Neuchâtel, le 10 février 1879, sur un canal servant de communication entre le lac et un arrière-port, ou quai en construction. (3)

3° Pour observer les seiches quand les dénivellations sont très faibles, et que le lac agité par des vagues ne permet pas la lecture de la hauteur de l'eau au moyen de règles limnimétriques, j'ai utilisé, avec succès, un petit appareil que j'ai appelé plémyramètre (4) ; il est très simple et très facile à installer.

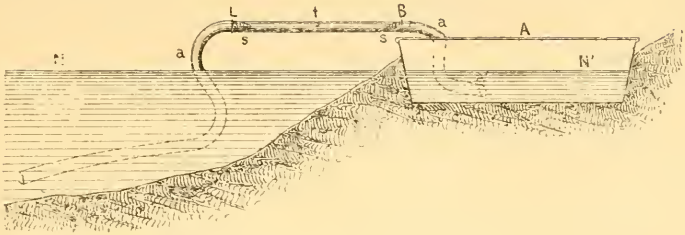
(1) Voir Essai monographique sur les seiches du Léman (loc. cit. p. 63, n° 8), p. 63.

(2) Voir ma 1re étude sur les seiches (loc. cit. p. 62, n° 1), 221 ; voir aussi p. 53 de ce volume.

(3) Lettre de Ph. de Rougemont. *Union libérale*, 1879, n° 35.

(4) De πλημυρα, marée.

Je prends un bassin de zinc, de bois ou de terre, (fig. 51. A) de



(Fig. 51) Le plémyramètre Forel.

quelque 6 ou 8 décimètres carrés de surface, et de 10 à 15cm de profondeur. Je l'enterre dans la grève jusqu'à ce que son fond soit un peu au-dessous du niveau de l'eau (*N*). Je le mets en communication avec le lac par un tube de caoutchouc *a*, *a*, *a*, de 1cm environ de diamètre, passant par-dessus le bord du bassin et agissant comme un siphon ; l'équilibre s'établit par ce tube, et si le niveau du lac subit des dénivellations rythmiques, l'équilibre se rétablit par des courants à direction alternative, suivant que l'eau est plus élevée dans le lac *N*, ou dans le bassin *N'*. Pour mettre en évidence la direction de ces courants, je place sur le trajet du siphon un tube de verre de 30cm de long, dans lequel je puis voir circuler les poussières en suspension dans l'eau ; pour faciliter l'observation, je place dans ce tube une petite sphère de cire, alourdie par du sable jusqu'à la densité de l'eau ; flottant entre deux eaux, elle suit tous les mouvements des courants ; deux petits arrêts en spire de laiton (*S*), placés aux extrémités du tube de verre, empêchent la sphère de cire de s'aller perdre dans les tubes de caoutchouc. Suivant la direction des courants, l'index va s'appliquer contre l'arrêt *L*, du côté du lac, quand l'eau est en baisse, ou contre l'arrêt *B*, du côté du bassin, quand l'eau monte. [1]

La sensibilité de cet appareil est extrême. Des dénivellations d'un millimètre, d'un dixième de millimètre, sont mises en évidence par les courants de l'eau. Son usage est très pratique. Il n'est pas encombrant, car l'instrument à porter en voyage se réduit à un tube de verre et un tube de caoutchouc, à supposer que l'on puisse se procurer un bassin étanche. Je ne puis assez le recommander aux voyageurs qui veulent s'occuper de l'étude des lacs.

[1] Pour les détails de construction, du jeu de l'appareil, et de l'interprétation des observations, voir ma IIe étude sur les seiches (loc. cit. p. 62, n° 2), p. 50 sq.

4° Enfin la méthode la plus parfaite est celle du limnographe ou limnimètre enregistreur. Nous en avons établi cinq appareils, de types divers, sur le lac Léman, à savoir : les limnographes fixes de Morges (F.-A. Forel, 1876), de Sécheron, près Genève (M. Ph. Plantamour, 1877), de Thonon (Ponts et Chaussées français, 1880), les limnographes portatifs de F.-A. Forel, 1878, et de M. Ed. Sarasin, 1879.

Tous sont bâtis sur le principe du marégraphe, modifié pour l'enregistrement de dénivellations du lac de 5 à 80 minutes de durée. Leurs traits généraux sont les suivants :

Un puits de dimensions suffisantes est mis en communication avec le lac par un tuyau d'alimentation assez large pour que l'eau du puits suive les dénivellations à longue période du lac, assez étroit pour que l'action des vagues et vibrations n'y soit pas trop sensible. Dans ce puits flotte un bassin ouvert par en haut [1], qui porte un mât vertical arrivant jusqu'à la hauteur de la table d'enregistrement. Au mât est fixé, par un ajustage convenable, un style, ou crayon, ou plume, qui dessine les dénivellations du lac sur un papier enregistreur, mu par un artifice d'horlogerie. Les dimensions du flotteur doivent être assez fortes pour que la pression de l'eau, même lorsque la dénivellation est très faible, surmonte facilement tous les frottements de l'appareil enregistreur.

Voici, comme exemple, les dimensions principales du limnographe de Morges qui présentait une sensibilité exquise, en même temps qu'une stabilité suffisante. Il était parfaitement approprié à l'étude des seiches de cette station.

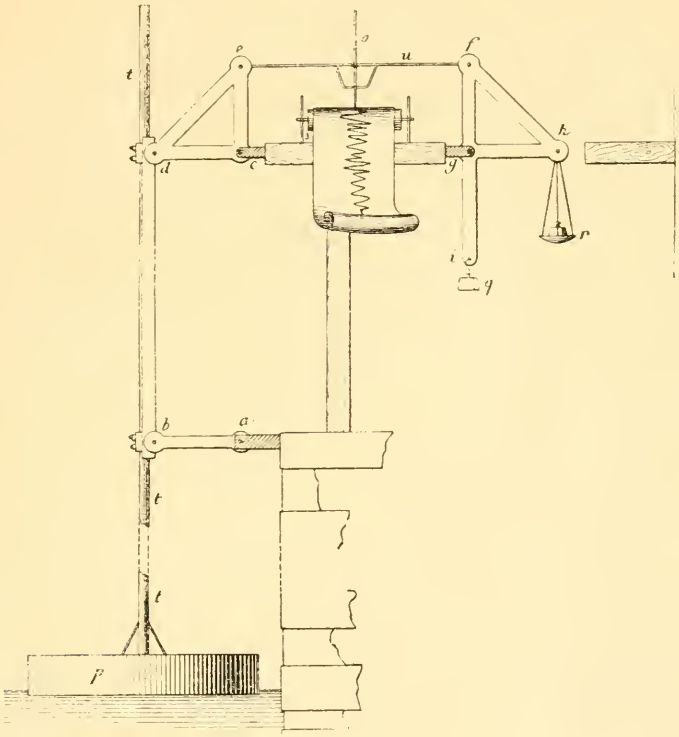
Superficie du puits	2^{m^2}
Tuyau d'alimentation, longueur	8.4^{m}
» diamètre	6^{cm}
Flotteur circulaire, diamètre	80^{cm}

L'appareil de transmission donnait les dénivellations de l'eau de grandeur naturelle, sans amplification, sans réduction.

La marche de l'horloge était primitivement calculée pour donner une vitesse d'enregistrement de 1^{mm} par minute, soit 6^{cm} par heure. Plus tard, quand j'eus étudié suffisamment les types des seiches de Morges, je l'ai réduite à 3^{cm} par heure.

[1] Les flotteurs sphériques ou cylindriques fermés doivent être évités. Les variations de température déterminent des variations de pression, et l'eau finit par les remplir par quelque fissure invisible du métal.

Mon limnographe de Morges (fig. 52) avait pour appareil de transmission un double parallélogramme articulé, *abcd*, et *aefg*, qui transformait les mouvements verticaux du flotteur *p*, et de son mât *t*, en un mouvement horizontal de la tringle d'enregistrement *u* : celle-ci portait, maintenue verticale par deux trous, un crayon *v*, qui pressait de son poids sur le papier à écoulement continu, et y dessinait les courbes des seiches ; des contrepoids convenables, *q* et *r*, mettaient



(Fig. 52.) Le limnimètre enregistreur de Morges, F.-A. Forel.

l'ensemble de l'appareil dans un état d'équilibre indifférent [1]. Les axes des parallélogrammes pivotaient aussi librement que possible, et ne prêtaient à aucun battement ; il n'y avait de perte de mouvement que par le jeu de la douille du crayon dans les trous qui le guidaient,

[1] Voir pour plus de détails ; *F.-A. Forel*, le limnimètre enregistreur de Morges. (Loc. cit. p. 63, n° 4).

c'est-à-dire une très petite fraction de millimètre. C'est ce qui explique la sensibilité parfaite de l'appareil, qui réagissait sous les plus faibles dénivellations de l'eau.

Le limnographe que M. Ph. Plantamour a fait établir en 1877 par la Société de construction d'appareils de physique de Plainpalais, et a fait installer dans sa villa de Sécheron, à 800m amont de la jetée des Pâquis du port de Genève, sur la rive droite du lac, est bâti sur le même système que mon limnographe. Il en diffère toutefois : 1° En ce que la transformation du mouvement vertical du flotteur en mouvement horizontal s'opère par des rubans de cuivre qui s'enroulent sur des poulies à gorges ; 2° en ce qu'à côté du crayon qui trace les dénivellations de l'eau en grandeur naturelle, un second crayon les reproduit avec une réduction au cinquième (cela pour obtenir l'inscription des grandes seiches qui sont parfois énormes à Genève) ; 3° en ce que l'appareil enregistre automatiquement les heures par une coche tracée sur la ligne de marche par un troisième crayon. (1)

Quel que soit le mécanisme de l'enregistrement, — chaque observateur peut le construire à son gré — on reconnaîtra que l'appareil est convenable, si les tracés répondent aux trois conditions que voici :

a Les oscillations du lac doivent se dessiner en courbes continues ; s'il y a dans le tracé des secousses ou escaliers, c'est une preuve que les frottements de l'appareil enregistreur sont trop forts ; on corrigera ce défaut en augmentant la superficie du flotteur.

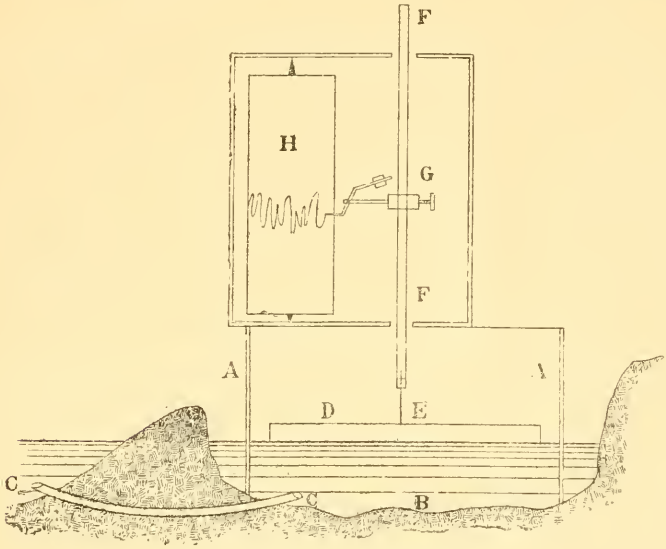
b Les oscillations de l'eau doivent se dessiner en courbes à sommets arrondis. Si les sommets des courbes des seiches sont aigus, c'est une preuve que le débit du tuyau d'alimentation est trop faible pour faire suivre à l'eau du puits les dénivellations du lac. On y obviera en raccourcissant le tuyau d'alimentation, ou en lui adjoignant un second tuyau.

c Les tracés des seiches doivent être simples ; s'ils présentent des hachures qui en élargissent le trait et le rendent confus, c'est une preuve que les vagues et vibrations, oscillations à type rapide, se font sentir avec trop d'intensité. On corrigera cet inconvénient en allongeant le tuyau d'alimentation, ou en rétrécissant son calibre.

5° Les limnimètres enregistreurs, ou limnographes fixes, permettent

(1) Voir pour les détails de la construction de ce magnifique appareil : *Ph. Plantamour,* Le limnographe de Sécheron (loc. cit. p. 63, n° 14).

l'étude très complète des variations de hauteur du lac et des dénivellations dans la station où ils sont établis. J'ai éprouvé le besoin d'avoir un appareil analogue, mais portatif, qui me donnât la facilité de faire la même étude en un point quelconque du lac. J'ai fait construire en 1878, par M. J. Cauderay, à Lausanne, mon limnographe portatif. Cet appareil consiste en : *a* un puits volant, formé d'une feuille de zinc, enroulée en cylindre (*A* fig. 53) de 50cm de diamètre et de 40cm de hauteur, que j'établis dans un creux de la grève ; le fond *B* du



(Fig. 53.) Limnographe portatif, Forel.

puits, est fermé par le sable ; comme canal d'alimentation, j'ai un tuyau de gutta-percha (*C*) de 2m de long, et de 15mm de diamètre interne.

b Le flotteur est un bassin de zinc (*D*), de 40cm de diamètre ; le mât en fer (*E*), se soude par un bouchon de liège à un tube de laiton (*F*), qui traverse l'appareil enregistreur.

c Sur le tube de laiton (*F*), s'adapte un petit ajustage (*G*), qui porte un crayon horizontal ; un poids, à l'extrémité d'un levier excentrique, le fait presser contre le papier de l'enregistreur.

d Le cylindre enregistreur (*H*) est vertical ; il est en bois, recouvert d'une feuille de papier que je change quand il est nécessaire. Il est

mis en rotation par un mouvement d'horlogerie (masqué par le cylindre dans la fig. 53), avec une vitesse de 3^{cm} par heure.

Mon limnographe portatif fonctionne parfaitement et m'a donné des tracés excellents. Il peut être installé partout où il y a une plage, avec grève exondée. Il demande cependant à être surveillé ; exposé qu'il est à être dérangé par un passant trop curieux, il ne peut être abandonné sans un gardien, et il ne saurait être utilisé commodément pour une longue série d'observations, durant des semaines ou des mois.

C'est à ces inconvénients que M. le Dr Ed. Sarasin a paré fort ingénieusement quand il a fait établir par la Société genevoise de construction d'instruments de physique son limnimètre enregistreur transportable (1). C'est un limnographe stable qui fonctionne parfaitement pendant des semaines et des mois, comme ceux de Morges et de Sécheron mais il peut à volonté être transporté d'une station à l'autre.

Le puits est un cylindre de zinc de 35^{cm} de diamètre et de $1{,}5^{m}$ de hauteur ; on le plonge dans le lac à mi-hauteur et on l'assujettit à un pilotis. Le flotteur est une lentille biconvexe, portant une tige à laquelle se fixe un ruban de cuivre qui passe sur une poulie, en mettant celle-ci en mouvement. L'axe mobile de la poulie, par une transmission convenable, fait glisser latéralement une tringle horizontale qui porte le crayon, et dessine les oscillations de l'eau sur un papier sans fin mis en marche par un artifice d'horlogerie. L'appareil enregistreur est logé dans une caissette bien fermée qui peut être posée sur le mur d'un quai ou dans la chambre d'une maison de bains.

Le limnographe Sarasin enregistre les dénivellations du lac de grandeur naturelle : il est réglé à la vitesse de 1^{mm} à la minute et de 6^{cm} à l'heure. L'instrument a fonctionné à parfaite satisfaction dans de nombreuses stations du Léman et des lacs de Zurich, de Constance et de Neuchâtel.

LES ALLURES DES SEICHES

A l'aide des diverses méthodes d'observation décrites dans le paragraphe précédent, nous avons, mes amis et moi-même, étudié, dans les vingt dernières années, les seiches du Léman et celles de quelques

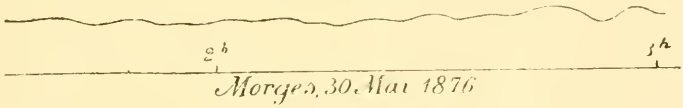
(1) Voir la description de M. Sarasin : Arch. de Genève II, 724, 1879.

autres lacs. Le matériel réuni est considérable ; je l'analyserai dans cette première étude générale en m'en tenant aux grandes lignes et aux faits probables ou certains, et en me bornant à indiquer sans chercher à les interpréter, quelques détails qui ne sont pas encore suffisamment clairs.

Les allures des seiches sont le mieux mises en évidence par les tracés continus des limnographes. Les observations isolées obtenues par d'autres méthodes fournissent des faits accidentels souvent intéressants: elles nous ont été fort utiles dans le développement des recherches qui nous ont conduit à l'explication du phénomène; mais quand l'observation est isolée, on n'en voit pas l'enchaînement avec les événements antérieurs et postérieurs, on n'en a pas la raison d'être ni les conséquences. C'est donc essentiellement sur l'étude des tracés limnographiques que je me fonderai pour apprendre à connaître les seiches : tous les exemples que je figurerai sont tirés de ces tracés.

Il est très rare que le lac soit au calme plat au point de vue des seiches. Dans les six années pendant lesquelles le limnographe de Morges a dessiné pour moi les allures du lac, je n'ai pas eu un seul jour où je n'aie pu retrouver les indices d'un mouvement rythmique.

La figure 54 donne un exemple d'un lac immobile, sans seiches; mais cependant on y aperçoit des traces d'ondulations, ondulations de 10 minutes de durée, et de 1mm à peine de hauteur.



(Fig. 54.) Calme plat au point de vue des seiches. Morges. Grandeur naturelle. 6 cm. par heure.

Le plus souvent, on peut dire toujours, le tracé limnographique présente des ondulations régulières ou irrégulières, parfois très faibles, quelques millimètres de hauteur, parfois très fortes, quelques centimètres, parfois énormes, quelques décimètres de hauteur. Il n'est pas toujours facile d'en démêler au premier abord la signification; ce n'est que par l'étude attentive et répétée, souventefois renouvelée de longues suites de tracés, que l'on arrive à reconnaître, dans les courbes souvent compliquées, brodées d'oscillations secondaires de divers ordres, les types définis des seiches; avec de la patience et de la persévérance, on obtient une appréciation très sûre qui n'est pas

sans étonner, et scandaliser peut-être, le spectateur improvisé de ces documents, mais qui n'en est pas moins très certaine. J'en appelle ici à l'expérience de mes amis et collègues, MM. Ph. Plantamour, Sarasin et Delebecque, qui ont étudié avec intérêt et succès les tracés de leurs limnographes.

Types des seiches du Léman.

Je commencerai par présenter au lecteur un fragment de l'un de ces tracés limnographiques, fig. 55; il donne en réduction au tiers la courbe du lac à Morges du 21 août 1876 à 23^h, au 22 août à 15^h. (1)

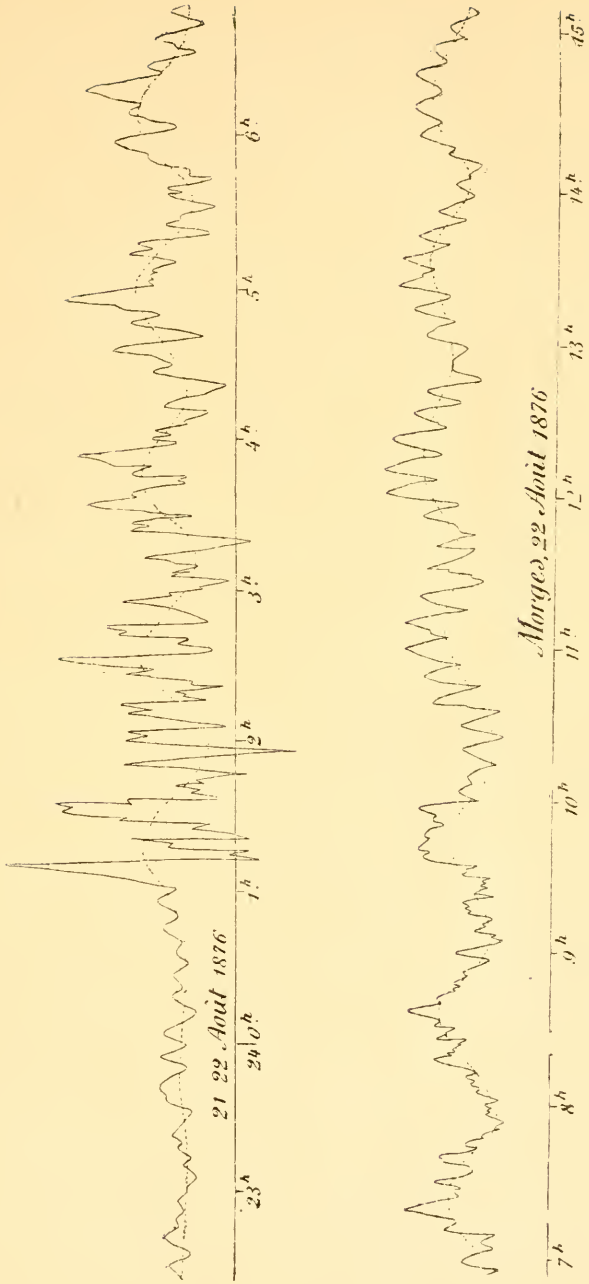
Il me servira d'exemple pour analyser quelques-uns des caractères du phénomène des seiches. Je rappelle ici que le limnographe de Morges dessinait les dénivellations du lac en grandeur naturelle, avec une vitesse d'enregistrement de 1^{mm} par minute; avec une réduction au tiers, les variations de l'eau sont trois fois trop petites, et les temps sont donnés à raison d'un millimètre pour trois minutes, de 20^{mm} pour une heure. (2)

a On trouve sur le tracé de la figure 55 des ondulations de divers types, et il n'est pas difficile d'y discerner des oscillations de 10 minutes de durée (6 ondulations par heure), sont le mieux dessinées le 22 août de 10 à 13^h — et des oscillations de 73 minutes de durée (soit a près de 1 $^1/_4$ heure) ces dernières commencent à apparaître le 22 août à 1^h; — pour en faciliter la lecture, j'ai représenté par un pointillé fin la courbe moyenne de ces oscillations de 73 minutes.

b Ces ondulations — appelons-les des *seiches*, — sont parfois régulières, parfois irrégulières. Ainsi les seiches de 10 minutes sont relativement régulières le 22 août de 10 à 15^h, elles le sont moins le 21 août à 23 et 24^h; elles sont très irrégulières le 22 août de 1 à 3 et 6 heures. Mais, là même où elles sont le plus compliquées, on reconnaît cependant le type général de 6 seiches par heure, sous le dessin mouvementé par les broderies d'oscillations de second et de troisième ordre.

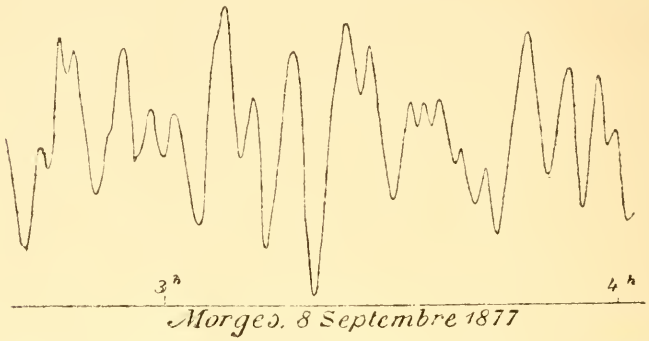
(1) Dans toutes nos études sur les seiches, nous comptons les heures de la journée en une seule série de 24 heures commençant à minuit.

(2) Pour cause de bonne ordonnance de mes dessins, j'ai dû employer dans les figures 55 et suivantes des échelles souvent différentes pour la hauteur des dénivellations et pour la vitesse de l'enregistrement. J'ai eu soin de les indiquer dans le titre de chaque figure. Je prie instamment le lecteur qui voudra comparer entre elles ces figures de faire attention à ces différences d'échelles.



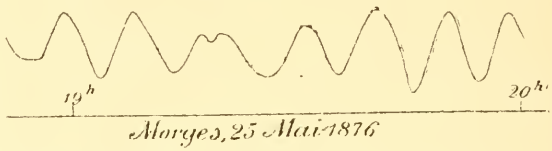
(Fig. 55.) Seiches de Morges, 21-22 août 1876. Dénivellations 1/3 grandeur naturelle. Vitesse 3 cm. par heure.

Je tiens à donner une bonne idée de ces irrégularités, afin que l'on comprenne mieux la régularité des seiches quand celles-ci sont régulières. Dans une figure 56, je représente des seiches très irrégulières



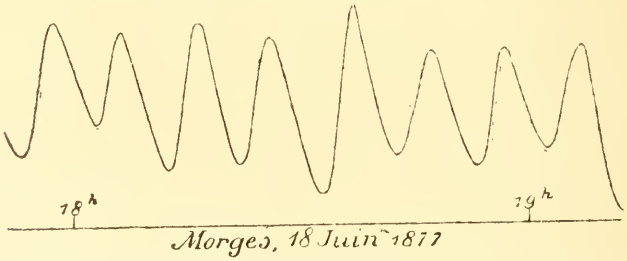
(Fig. 56.) Seiches irrégulières de Morges. Grandeur naturelle ; 6 cm. par heure.

de 10 minutes, tirées des tracés de Morges (grandeur naturelle pour les dénivellations de l'eau, vitesse d'enregistrement 1mm par minute). Dans les figures 57, 58 et 59 je donne à la même échelle des exemples



(Fig. 57.) Seiches de 10 minutes de Morges. Grandeur naturelle ; 6 cm. par heure.

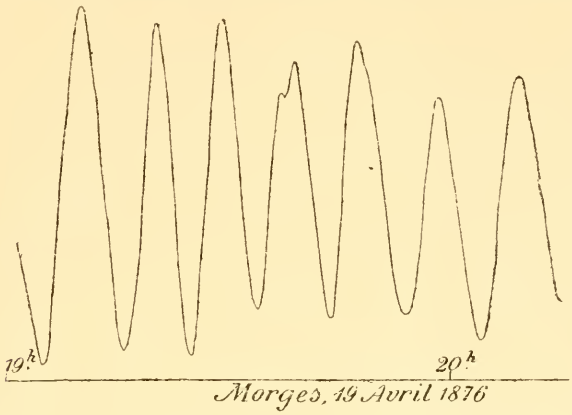
de seiches régulières. On y verra que, même dans ce cas, la régularité du mouvement n'est pas absolue, qu'il y a des différences de hauteur



(Fig. 58.) Seiches de 10 minutes de Morges. Grandeur naturelle ; 6 cm. par heure.

dans deux seiches consécutives, qu'il y a parfois de petits accrocs dans le développement des courbes, par exemple le 25 mai 1876, à 19h, 15min (fig. 57) ; le 19 avril à 19h, 35min (fig. 59).

Quoi qu'il en soit de ces petites déviations à l'uniformité absolue de l'oscillation, on peut dire que le phénomène a une belle régularité générale. Ce caractère est saisissant, il est imposant; je ne sais assez

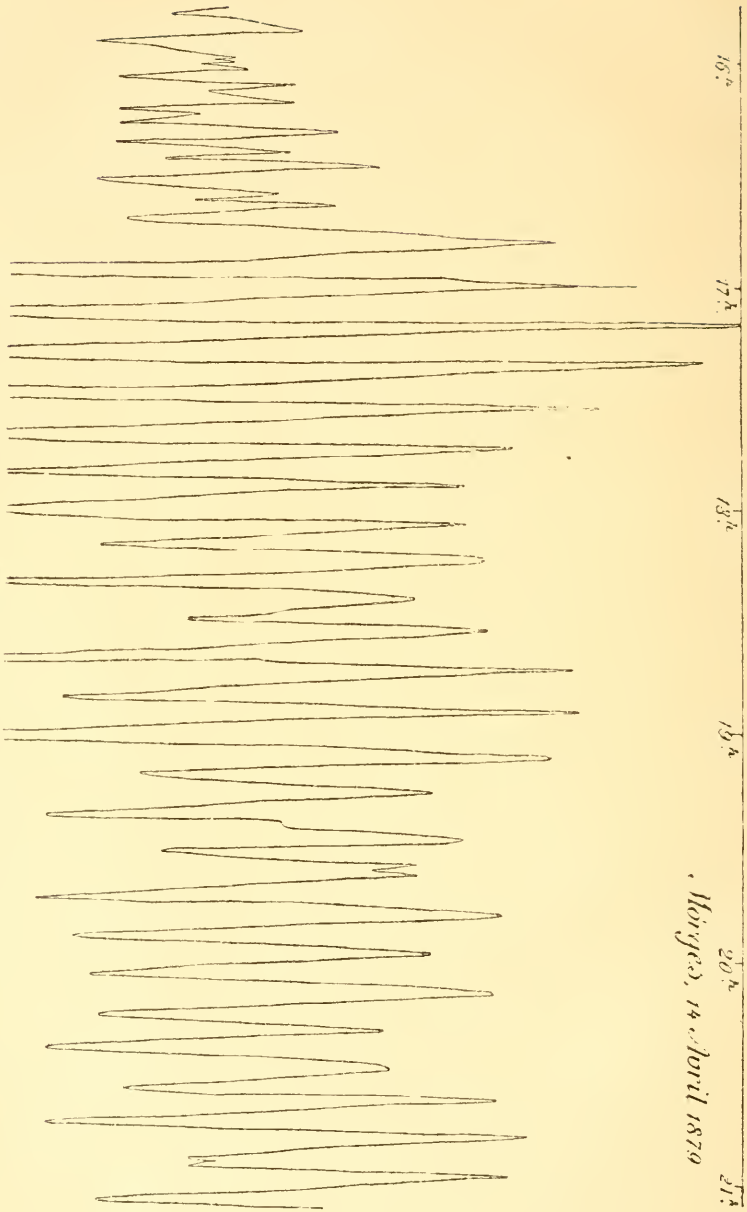


(Fig. 59.) Seiches de 10 minutes de Morges. Grandeur naturelle; 6 cm. par heure.

admirer la puissance et la grandeur de ce mouvement pendulaire qui fait balancer l'énorme masse de l'eau du Léman avec une ampleur d'allures aussi étonnante. Cette constatation est assez importante pour que je veuille encore en donner un exemple dans la figure 60, qui représente de grandes seiches de 10 minutes à Morges. Pour raison d'économie d'espace et de papier, j'avais ralenti la vitesse d'enregistrement de mon appareil qui ne débitait plus que 1^{mm} en 2 minutes, 3^{cm} par heure; aussi dans la fig. 60, les seiches, qui paraissent plus serrées que dans les fig. 57 à 59, sont cependant toujours des seiches de 10 minutes; les dénivellations sont de grandeur naturelle. Ces seiches du 14 avril 1879 ont dépassé 11.5^{cm} de hauteur; dans le tracé que j'ai copié pour la figure 60, on ne les voit pas dans tout leur développement, un arrêt malencontreux ayant limité la marche du crayon enregistreur pendant la seiche basse.

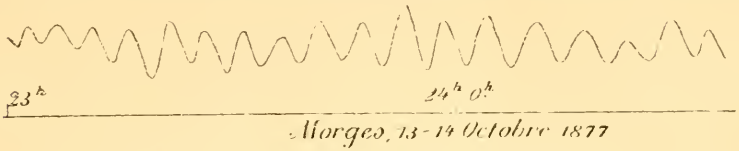
c Les seiches de même type sont tantôt plus hautes, tantôt moins hautes. Dans notre exemple de la figure 56, les seiches sont au moins trois fois plus hautes, le 22 août, à 11^h, que le 21 août, à 23 ou 24^h; les seiches du 25 mai 1876 (fig. 57) ont 1^{cm} de hauteur, celles du 14 avril 1879 (fig. 60) ont plus de 11^{cm}.

d A côté de ces seiches de 10^{min} qui sont le type le plus fréquent dans les seiches de Morges, on trouve assez souvent des seiches de



(Fig. 60.) Seiches de 10 minutes de Morges. Grandeur naturelle : 3 cm. par heure.

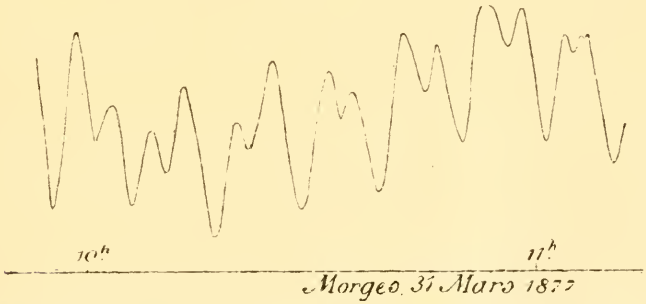
5min ; j'en donne un exemple dans la figure 61. Elles sont rarement aussi régulières que dans ce cas ; le plus souvent elles sont irrégulières ; elles offrent du reste les mêmes variations de hauteur que nous



(Fig. 61.) Seiches de 5 minutes de Morges. Grandeur naturelle; 6 cm. par heure.

avons décrites aux seiches de 10min. Ce sont ces seiches de 5min qui se sont trouvées représentées le plus fréquemment dans les observations que j'ai faites sur les courants du goulet du port de Morges (page 53).

e Parfois, ces seiches rapides, de 5min de durée, présentent un caractère intéressant. Les oscillations successives varient périodiquement de hauteur; à une oscillation faible succède une oscillation forte, puis une faible, puis une forte, et ainsi de suite; il y a alternance de seiches plus hautes et moins hautes, chacune des formes, seiches élevées et seiches peu élevées, apparaissant toutes les dix minutes. Nous étudierons attentivement dans un paragraphe ultérieur ce type intéressant que nous appelons seiches dicrotes; nous nous bornons à l'indiquer ici en en donnant deux exemples (fig. 62 et 63) à la



(Fig. 62.) Seiches dicrotes de 10 minutes de Morges. Grandeur naturelle; 6 cm. par heure.

même échelle que les figures précédentes et par conséquent comparables avec elles [1]. Disons déjà, en anticipation de ce que nous verrons plus loin, que ces seiches dicrotes sont dues à l'interférence de seiches de 10min et de seiches de 5min.

f Outre ces seiches de 10min, de 5min, et ces seiches dicrotes, nous

[1] Voir encore fig. 55, p. 97, quelques seiches dicrotes, le 22 août, à 5 h.

voyons souvent sur les tracés de Morges des oscillations de plus courte durée, régulières ou irrégulières ; voyez par exemple sur notre figure 55 (p. 97) les dentelures irrégulières du 22 août, de 7^h à 10^h, ou les dentelures qui de 1^h à 4^h altèrent le dessin des grandes seiches de

(Fig. 63.) Seiches de 10 minutes, dicrotes, de Morges. Grandeur naturelle : 6 cm. par heure.

10^{min}. Elles sont inconstantes, irrégulières, et je n'ai pas essayé d'y rechercher des types définis ; nous ne nous en occuperons pas pour le moment ; elles se relient à ce que nous décrirons plus loin sous le nom de vibrations.

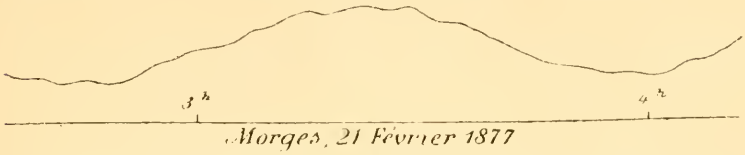
C'est la combinaison de ces seiches rapides, de 5 minutes et moins de durée, qui a abaissé la moyenne de durée des oscillations du lac, à Morges, que j'avais trouvée, par l'étude des courants au goulet du port, être de $4\ ^1/_2{}^{min}$ seulement. Les tracés limnographiques ont corrigé l'erreur que j'avais faite en employant une méthode moins parfaite, et j'ai constaté que le type normal des seiches de Morges est bien de 10^{min} de durée.

g Enfin nous reconnaissons que les seiches de divers types peuvent se superposer et interférer ensemble. Nous venons de voir dans les seiches dicrotes l'interférence régulière des seiches des types de 10^{min} et de 5^{min}. Dans la fig. 55, nous voyons des seiches de 73^{min} porter la broderie de seiches plus rapides : le 22 août, de 1 à 4^h, des seiches de 10^{min} irrégulières, — à 5^h, des seiches dicrotes, — de 6 à 10^h, des seiches rapides irrégulières, — de 10 à 15^h, des seiches de 10^{min} régulières.

Ces seiches de 73^{min}, nous les trouvons bien dessinées sur les tracés de Morges ; elles y sont peu hautes, et n'y atteignent pas la superbe amplitude des tracés de Genève, mais elles y sont cependant parfaitement reconnaissables. Dans la figure 55, nous en avons un exemple, un peu compliqué par les seiches plus rapides qui altèrent

la courbe des grandes seiches de 73min ; dans la figure 64, nous représentons la courbe simple de l'une de ces seiches à longue période.

En résumé, je reconnais, sur les tracés limnographiques de Morges,



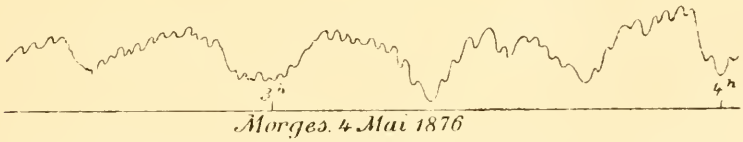
(Fig. 64.) Seiche de 73 minutes à Morges. Grandeur naturelle ; 6 cm. par heure.

des courbes bien dessinées que j'appelle des seiches ; j'y constate plusieurs types différents par leur durée ou leurs caractères ; ces types se reproduisent assez fréquemment pour que je puisse les dire normaux dans cette station. Ces types, auxquels par anticipation je donnerai des noms, sont :

les seiches de	73	minutes	—	seiches	longitudinales uninodales
—	10	—	—	—	transversales uninodales
—	5	—	—	—	transversales binodales
—	5	—	dicrotes	—	transversales avec interférence d'uninodales et de binodales.

En ordre de fréquence, je puis les classer comme suit : les plus fréquemment représentées sont les seiches de 10min, régulières ou irrégulières, puis celles de 5min irrégulières, puis celles de 73min, toujours régulières, puis celles de 5min régulières, et celles de 5min dicrotes, qui sont relativement rares.

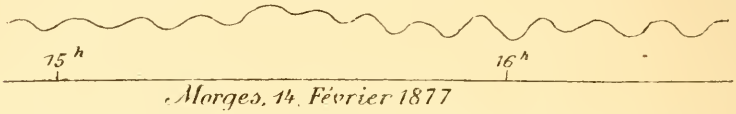
A côté de ces seiches normales, caractéristiques de la station, j'y trouve parfois des types extraordinaires, très rares, qui semblent bien définis si j'en juge par la régularité des tracés, mais dont je ne connais pas encore la signification. Je citerai entr'autres des seiches de 20min environ de durée (fig. 65) et des seiches de 7min (fig. 66).



(Fig. 65.) Seiches de 20 minutes à Morges. Grandeur naturelle : 6 cm. par heure.

Je me suis étendu longuement sur les seiches de Morges ; il était nécessaire de faire cette étude dans une des stations du lac pour constater l'existence des seiches, ondulation ou oscillation de l'eau se des-

sinant en courbes parfaitement reconnaissables sur les tracés limnographiques, pour constater en second lieu, dans cette station, l'existence de types divers de seiches, types bien définis, bien caractérisés. J'ai choisi les seiches de la station de Morges, qui est celle que je connais le mieux. J'espère que les quelques figures données ci-des-



(Fig. 66.) Seiches de 7 minutes de Morges. Grandeur naturelle ; 6 cm. par heure.

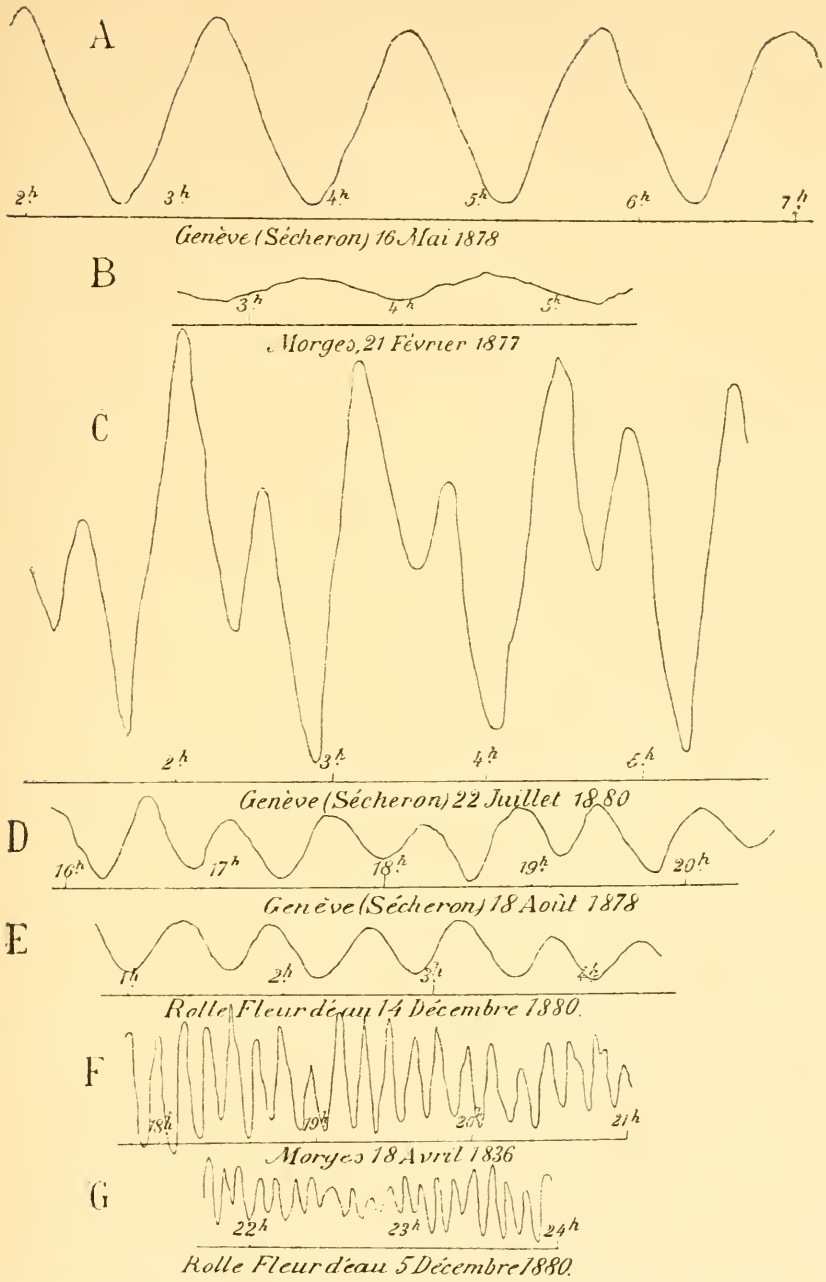
sus suffiront à faire comprendre au lecteur qu'il y a là un phénomène, et un beau phénomène, qui mérite d'être étudié et expliqué, que ce phénomène se traduit par des dénivellations rythmiques de l'eau ; que ces dénivellations sont de divers ordres.

Je pourrais répéter cette étude sur les tracés limnographiques des autres stations du lac ; j'arriverais aux mêmes résultats généraux. Dans toutes les stations du Léman où nous avons établi des limnographes permanents ou temporaires, où nous avons installé notre plémyramètre, nous avons reconnu des faits analogues ; partout il y a des dénivellations rythmiques de l'eau, partout elles correspondent à des types définis. J'épargne à mon lecteur, et je m'épargne à moi-même la répétition de cette démonstration ; elle serait fastidieuse.

Mais il y a plus. En comparant les tracés des diverses stations, nous trouvons d'une station à l'autre des similitudes et des différences importantes que nous devons analyser ; je les préciserai en les illustrant par la planche V (page 105), où j'ai représenté les seiches du Léman à la même échelle, en réduisant au tiers les tracés des limnographes, c'est-à-dire en donnant les hauteurs des dénivellations trois fois plus petites que la grandeur naturelle, et en arrêtant la vitesse de l'enregistrement à 2^{cm} par heure. [1]

1° Certains types de seiches que nous avons reconnus à Morges se retrouvent dans d'autres stations. Ainsi par exemple les seiches de 73^{min} de Morges existent à Genève, au Rivage, à Bellevue, existent à Evian, à Vevey, à la Tour de Peilz, à Veytaux, à Chillon ; elles y sont

[1] Dans cette planche et dans plusieurs des figures suivantes, j'ai reproduit des tracés venant des autres limnographes du lac. Je témoigne à MM. Ph. Plantamour, Ed. Sarasin et A. Delebecque ma vive reconnaissance pour la libéralité avec laquelle ils m'ont permis d'utiliser les documents précieux qu'ils ont réunis.



(Planche V.) Types normaux des seiches dans diverses stations. 1 3 grandeur naturelle. 3 cm. par heure, (Limnographes Plantamour, Sarasin et Forel.)

même beaucoup plus belles et mieux dessinées qu'à Morges. Ces seiches de 73 minutes se voient encore très nettement sur les tracés de Thonon; elles peuvent se deviner sur les tracés de Rolle; mais dans ces deux stations elles sont sensiblement plus faibles qu'à Morges. Dans ma planche IV, le tracé *A* représente des seiches de 73^{min} de la station de Sécheron, à Genève, dessinées par le limnographe de M. Ph. Plantamour, le tracé *B*, des seiches de même type, dessinées à Morges par mon limnographe. Alors même que la hauteur est différente, la durée étant exactement la même, il n'y a aucun doute que l'une et l'autre courbe ne donnent des oscillations du même type.

2° Toutes les seiches de Morges ne se retrouvent pas dans toutes les autres stations. Ainsi les seiches de 10^{min} (Pl. V, *F*) que nous avons dit être les seiches normales de Morges, et leurs dérivés, seiches de 5^{min} et seiches dicrotes, se voient dans les stations de la côte directement opposée, Evian et Amphion, mais elles sont inconnues à Thonon, à Rolle, dans le Petit-lac et dans le Haut-lac.

3° Un type que nous n'avons jamais trouvé, même accidentellement à Morges, se trouve au contraire fort bien développé ailleurs, ce sont les seiches de 35^{min} (pl. IV, *D* et *E*.). A Rolle, à Thonon, à Anthy, dans le Haut-lac et dans le Petit-lac, ces seiches sont très bien dessinées; ce sont des seiches normales. Elles n'existent pas à Morges, elles se retrouvent dans la plupart des autres stations que nous avons étudiées.

4° Dans certaines stations comme Thonon et Rolle, ces seiches de 35^{min} sont les seules seiches de longue périodicité; celles de 73^{min} n'y existent pour ainsi dire pas. Ainsi, à Morges, présence de seiches de 73^{min} et absence de seiches de 35^{min}, à Rolle, présence de seiches de 35^{min} et absence de seiches de 73^{min}.

5° Dans les stations des régions terminales du lac, celles de Genève et du Petit-lac, celles de Chillon et du Haut-lac, aussi bien les seiches de 73^{min}, que celles de 35^{min}, sont représentées. Elles peuvent s'y trouver isolément (pl. V. *A* et *D*) ou bien il peut y avoir superposition de ces deux types, interférence entre les deux ordres de seiches, production de seiches dicrotes (Pl. V, *C*). Celles-ci sont analogues à celles que nous avons vues à Morges par la superposition des seiches de 10^{min} et de 5^{min}.

6° Le même type de seiches se reproduit dans diverses stations, mais il n'y a pas nécessairement la même hauteur. Indépendamment des variations journalières de hauteur, il y a des variations générales

dans les allures des mêmes seiches ; si l'on prend par exemple les seiches de la même journée, ou bien les seiches maximales dans les deux stations, on reconnaît facilement des différences de hauteur. Ainsi les seiches de 73^{min} qui sont nulles à Rolle sont très faibles à Morges, où elles n'ont que quelques millimètres de hauteur ; à Chillon, elles sont mieux accusées et s'y mesurent par centimètres ; à Genève, elles sont énormes et y atteignent des décimètres et plus. Ainsi les seiches de 35^{min} sont énormes à Genève, moins fortes dans le Haut-lac, plus faibles mais encore fort bien accentuées à Rolle ; elles sont nulles à Morges.

7° Les seiches de type rapide n'existent qu'à Morges et Evian sous la forme d'oscillation de 10^{min} (pl. V, *F*), et de 5^{min} ; à Thonon et Rolle elles sont représentées par des oscillations de 7^{min} (pl. 5, *G*).

8° Les types anormaux varient aussi d'une station à l'autre. A Morges, nous avons décrit sous cette appellation des seiches de 7^{min} et de 21^{min}. A Genève, nous en trouvons de 6^{min}, de 7^{min}, de 8^{min}, de 15^{min}, de 20^{min}.

Il résulte de cela que chaque station a au point de vue des seiches un caractère spécial ; chaque station présente un groupement particulier de types divers dont les uns sont prédominants, d'autres moins fréquents, d'autres accidentels. Sans entrer dans d'autres détails pour chaque station du Léman, je caractériserai comme suit, au point de vue des seiches, les principales localités, en utilisant le matériel que nous possédons actuellement, et que j'énumérerai dans un paragraphe ultérieur.

Station de Genève :

Types normaux. Seiches de 73^{min}.
— de 35^{min}.
— dicrotes 73 — 35^{min}.

Les seiches de ces trois types ont leur maximum de hauteur dans cette station.

Types absents. Seiches de 10^{min}, de 7^{min}, de 5^{min}, qui n'apparaissent qu'à titre purement accidentel.

Types accidentels. Seiches de 6, de 7, de 8, de 15, de 20^{min}.

Station du Rivage, à 3^{km} de Genève, sur la rive droite du lac, et **station de Bellevue**, même rive, à 5^{km} de Genève.

Mêmes types de seiches, mais avec un développement en hauteur un peu moins fort qu'à Genève.

Stations de Rolle, de Fleur d'eau près Rolle, de **Thonon,** d'**Anthy,** près Thonon :

Types normaux. Seiches de 35^{min}.
Seiches de 7^{min}.

Les seiches de 35^{min} sont moins hautes qu'à Genève, celles de 7^{min} sont très hautes et très bien marquées.

Types absents. Seiches de 73^{min}.(1)
Seiches de 10^{min}.

Station de Morges :

Types normaux. Seiches de 73^{min}.
Seiches de 10^{min}.
Seiches de 5^{min}.

Les seiches de 73^{min} sont très peu hautes ; celles de 10 et de 5^{min} sont au contraire très bien marquées.

Types absents. Seiches de 35^{min} et de 7^{min}, cette dernière apparaît cependant accidentellement.

Station d'Evian. Autant que j'en puis juger par quelques observations plémyramétriques, les seiches y sont les mêmes qu'à Morges.

Stations de Chillon. Veytaux, la Tour-de-Peilz. Vevey.

Types normaux, comme à Genève, mais de hauteur moindre.

Types accidentels, seiches de 10 minutes et de 20 minutes.

— Ces déterminations sont basées sur l'étude de matériaux considérables. Nous avons en effet actuellement, dans les tracés des limnographes Plantamour, Sarasin, Forel et du limnographe de Thonon, une vingtaine de kilomètres de longueur de ces dessins automatiquement figurés par le lac lui-même, sans parler des observations nombreuses et diverses faites par d'autres méthodes. Notre généralisation est donc fondée sur des documents abondants ; celui qui voudra les dépouiller après nous, y trouvera encore de nombreux faits à découvrir. Nous nous bornons aujourd'hui aux grands traits d'une première étude.

Séries de seiches.

Ces formes normales ou anormales de seiches étant reconnues, nous établissons que les seiches apparaissent non pas isolément ou

(1) Je répète ce que j'ai dit plus haut : A Thonon et à Rolle les seiches de 73^{min} sont reconnaissables sur les tracés : mais elles y sont tellement faibles que je me sens autorisé à les dire absentes.

accidentellement, mais en séries. On ne voit pas une seiche unique, solitaire, faire une dénivellation, puis l'eau rentrer dans le calme plat ; les seiches sont toujours en groupes plus ou moins nombreux de même forme, de même type, de même durée. C'est déjà apparent dans les dessins que nous avons donnés à titre d'exemples, fig. 55 à 65, et pl. V, p. 105. Sauf le cas des seiches irrégulières, où il y a complication plus ou moins inextricable d'ondulations diverses, les oscillations qui se suivent sont de même type.

Ces séries de seiches durent plus ou moins longtemps. Quelquefois elles ne comprennent que quelques oscillations ; quelquefois la série est beaucoup plus longue et compte des vingtaines, des cinquantaines de seiches successives. D'où proviennent ces différences ? Cela résulte de l'apparition fréquente de nouvelles séries ; une série de seiches n'a ordinairement pas le temps de s'éteindre spontanément : elle est détruite par la production d'une nouvelle série, qui elle-même sera remplacée par d'autres. Ainsi, dans notre tracé de la fig. 55, p. 97, nous voyons une première série de seiches régulières de 10^{min}, très peu hautes, remplacée à 1^h par de hautes seiches irrégulières ; à 5^h apparaissent quelques seiches dicrotes ; à 10^h se développe une belle série de seiches de 10^{min} qui continuent à osciller jusqu'à la fin du tracé, à 15^h. La longueur des séries de seiches dépend donc de la fréquence des apparitions de nouvelles séries ; quand les impulsions génératrices des seiches sont rares, les séries sont plus longues.

Nous avons des exemples de séries de cinquante seiches successives dans les seiches à courte période de 10^{min} (par exemple dans la fig. 60, on voit 25 seiches qui forment le commencement d'une série beaucoup plus longue), et aussi dans les seiches à longue période de 35 et de 73 minutes. Je citerai, comme belles séries, celles des seiches de 73^{min} (ou dicrotes de 73 et 35^{min})

du 20 février 1877	début à	5^h	68	seiches en	83	heures.
25 novembre 1877	—	1^h	84	—	103	—
24 janvier 1879	—	17^h	99	—	122	—
26 mars 1891	—	21^h	148	—	180	—

Une question se pose à nous : S'il ne survenait pas de série intercurrente, une série de seiches continuerait-elle à osciller indéfiniment ? En aucune façon. Une série de seiches est composée d'oscillations successives, de hauteur décroissante, diminuant progressivement de grandeur jusqu'à ce que leur hauteur soit réduite à zéro. Ce fait est

très important, car il est caractéristique de la vague de balancement comme nous l'avons vu dans un paragraphe précédent. Mais il n'est pas facile à constater sur les seiches du Léman ; la décroissance y est si faible qu'elle échappe le plus souvent à l'observation. Dans certains cas cette décroissance paraît évidente, et on voit une série de seiches présenter une diminution très marquée de hauteur. Ainsi, dans notre figure 59, de 19^h à 20^h, les seiches de Morges, du 19 avril 1876, ont passé de 5 à 3^{cm} de hauteur ; et dans la figure 60, on voit les seiches décroître de hauteur le 24 avril 1879, de 17^h à $18\ ^1/_4{}^h$, puis de $18\ ^3/_4$ à $19\ ^1/_2{}^h$, etc. Mais ce n'est là qu'une illusion ; en réalité, la décroissance est beaucoup plus lente ; ce n'est qu'une illusion provenant d'une variation périodique dans la hauteur des oscillations d'une même série de seiches. Nous le prouverons en analysant la plus belle série que nous connaissions, celle qui a débuté le 26 mars 1891, et dont nous avons pu étudier, grâce à l'obligeance de M. Ph. Plantamour, les tracés dessinés par le limnographe de Sécheron.

Cette magnifique série de seiches de 73^{min} a commencé brusquement le 26 mars, à 21^h. Auparavant, le lac présentait des seiches irrégulières de 6 à 8^{cm} de hauteur : trois oscillations, croissantes de 16 à 20^{cm}, amenèrent le 27 mars, à 1^h, à une hauteur de seiches de 23^{cm}. Ces oscillations continuèrent régulièrement pendant $7\ ^1/_2$ jours, toujours simples, parfois d'une régularité parfaite ; la série s'est terminée le 3 avril, à 14^h, par l'apparition de seiches dicrotes. Pendant les 180 heures de ces $7\ ^1/_2$ journées, la série de seiches a présenté des variations de hauteur. Si je mesure individuellement chaque seiche, en prenant la différence entre la seiche haute et la seiche basse, si je groupe ces hauteurs par vingtaines, j'obtiens :

Seiches de la	1re à la 20e	hauteur moyenne	167mm
—	21e — 40e	—	198
—	41e — 60e	—	163
—	61e — 80e	—	169
—	81e — 100e	—	153
—	101e — 120e	—	109
—	121e — 140e	—	81
—	141e — 145e	—	70

D'après ces chiffres, la décroissance régulière n'a commencé qu'à partir de la 60e seiche ; jusqu'alors il y avait tantôt augmentation, tantôt diminution de la hauteur des seiches ; la moyenne de la 2e vingtaine

est supérieure à celle de la 1re, la 4e à la 3e. Il y a variation périodique dans la hauteur des seiches du début de cette série; cette périodicité serait-elle régulière ? Pour répondre à cette question, j'ai compensé d'une manière convenable (1) les inégalités individuelles des seiches consécutives, et j'ai obtenu pour les hauteurs relatives une courbe dont voici les maximums et les minimums :

Maximums.				Minimums.			
4e seiche	27 mars	0h	203mm	17e seiche	27 mars	17h	148mm
23e —	28 —	0h	200	26e —	28 —	4h	184
33e —	— —	12h	214	39e —	— —	20h	187
43e —	29 —	0h	191	54e —	29 —	14h	150
67e —	30 —	6h	179	71e —	30 —	11h	161
74e —	— —	15h	176	77e —	— —	19h	166
79e —	— —	21h	171	125e —	2 avril	7h	78
129e —	2 avril	12h	84	143e —	3 —	6h	70

Il n'y a évidemment aucune régularité dans ces variations.

Toujours est-il que dans la seconde moitié de la série, à partir de la 60e seiche, ou mieux à partir de la 80e, la décroissance devient régulière. C'est ce dont je donnerai une idée en réduisant dans ma planche VI, p. 113, le tracé original du limnographe de Sécheron, de la 83e à la 147e seiche, en conservant aux dénivellations leur hauteur naturelle, mais en réduisant la vitesse de l'enregistrement à 3mm par heure. Sur cette planche, on voit clairement la décroissance de hauteur dans la série des seiches, elle est incontestable ; mais on voit aussi que cette décroissance présente elle-même certaines irrégularités

Je comparerai ces allures à celles d'un pendule qui a reçu une impulsion trop brutale, ou de direction oblique à son plan de suspension ; il oscille un peu irrégulièrement pendant un certain temps ; ses battements sont bien réguliers dans leur durée, mais non dans leur amplitude ; puis tout se régularise, et il présente ensuite une série d'oscillations d'amplitude décroissante jusqu'à zéro. Les seiches sont des mouvements pendulaires, et leurs allures sont celles d'un pendule.

J'ai cherché, en tenant compte du taux de la décroissance constatée dans cette série de seiches du 26 mars au 3 avril 1891, combien d'oscillations elle aurait encore présenté s'il n'était pas survenu, à la 148e seiche, la nouvelle série de seiches dicrotes qui l'a interrompue.

(1) V. t. I, p. 299, note.

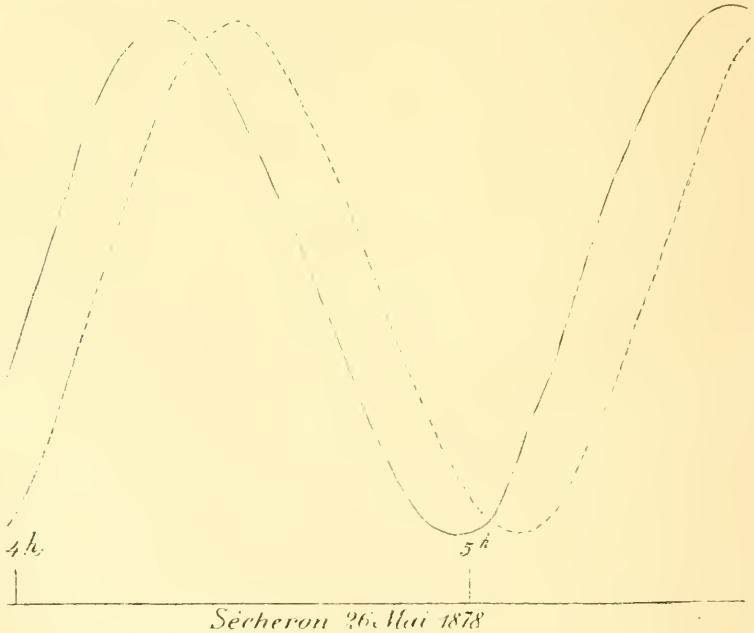
La 79e seiche mesurait 171mm de hauteur, la 139e, 72mm ; pour ces 60 seiches, la décroissance moyenne de l'une à l'autre a été de 1.65mm. A ce taux les 72mm de hauteur qui restaient à la 139e seiche auraient été réduits à zéro en 43 oscillations. La série complète eut donc présenté 182 seiches, avec une durée totale de 224h, soit 9 1/3 jours.

Quelle que soit l'irrégularité constatée dans les battements de ce pendule gigantesque, quel splendide phénomène sont ces oscillations qui se continuent avec une impertubable majesté, avec des coups espacés de 73 minutes, pendant 7 et 9 jours de suite, dans la masse gigantesque des 89 milliards de mètres cubes de notre lac !

En résumé les seiches apparaissent en séries de hauteur décroissante jusqu'à ce qu'elles soient réduites à zéro, ou qu'elles soient interrompues par le développement d'une autre série de seiches.

La sinusoïde des seiches.

Quelle est la courbe dessinée par le limnographe pendant une seiche ? En analogie à ce qui se passe pour la courbe de la marée dessi-



(Fig. 67.) Sinusoïde et seiche longitudinale uninodale du Léman.

née par un marégraphe, on peut supposer que ce doit être une sinusoïde, courbe dont les ordonnées sont les sinus des angles

indiqués par la valeur des abscisses. J'ai voulu vérifier cette supposition ; mais sur les tracés de Morges les seiches de 10^{min} sont trop serrées, les seiches de 73^{min} sont trop peu hautes pour que cette étude y fût facile ; je me suis adressé aux tracés de Sécheron (Genève) qui donnent dans un magnifique développement les grandes seiches de 73^{min}. Dans la figure 67, j'ai reproduit la courbe d'une seiche tirée des tracés de M. Ph. Plantamour ; puis j'ai calculé, pour la même échelle, et j'y ai porté la sinusoïde, qui est tellement semblable à la courbe de la seiche, que, pour éviter une superposition, j'ai dû écarter les deux courbes l'une de l'autre. La ressemblance est telle que je puis affirmer que la courbe des seiches est une sinusoïde. Suivant les rapports entre l'échelle employée pour représenter les valeurs angulaires (abscisses) et l'échelle employée pour représenter les sinus (ordonnées), autrement dit, suivant que nos limnographes dérouleront plus ou moins vite leur papier d'enregistrement, et suivant la hauteur relative des dénivellations, la courbe sinusoïde sera plus serrée ou plus aplatie. Tous les tracés de nos seiches sont probablement des sinusoïdes.

Seiches dicrotes.

La sinusoïde des seiches consécutives dans une même série n'est pas toujours identique ; deux seiches qui se suivent n'ont pas nécessairement la même courbe. Nous avons appelé seiches dicrotes [1] (en analogie avec le pouls dicrote des tracés sphygmographiques) le cas où il y a alternance régulière entre une seiche élevée et une seiche peu élevée. Nous en avons donné des exemples dans les figures 62 et 63 et dans la figure *C* de la planche V, page 105. Revenons sur ce fait qui présente un grand intérêt.

Pendant longtemps j'ai été intrigué par l'anomalie singulière que je reconnaissais sur les tracés de Genève ; les seiches successives de la même série n'étaient pas de même hauteur ; il y avait alternance constante d'ondes de grandeur différente. Ce cas est assez fréquent. Dans les six premières semaines de l'année 1879, j'ai compté sur les tracés de Sécheron :

Seiches simples	$11\frac{3}{4}$	jours
— dicrotes	$18\frac{1}{2}$	—
— irrégulières	12	—

[1] δι... κροτος, double battement.

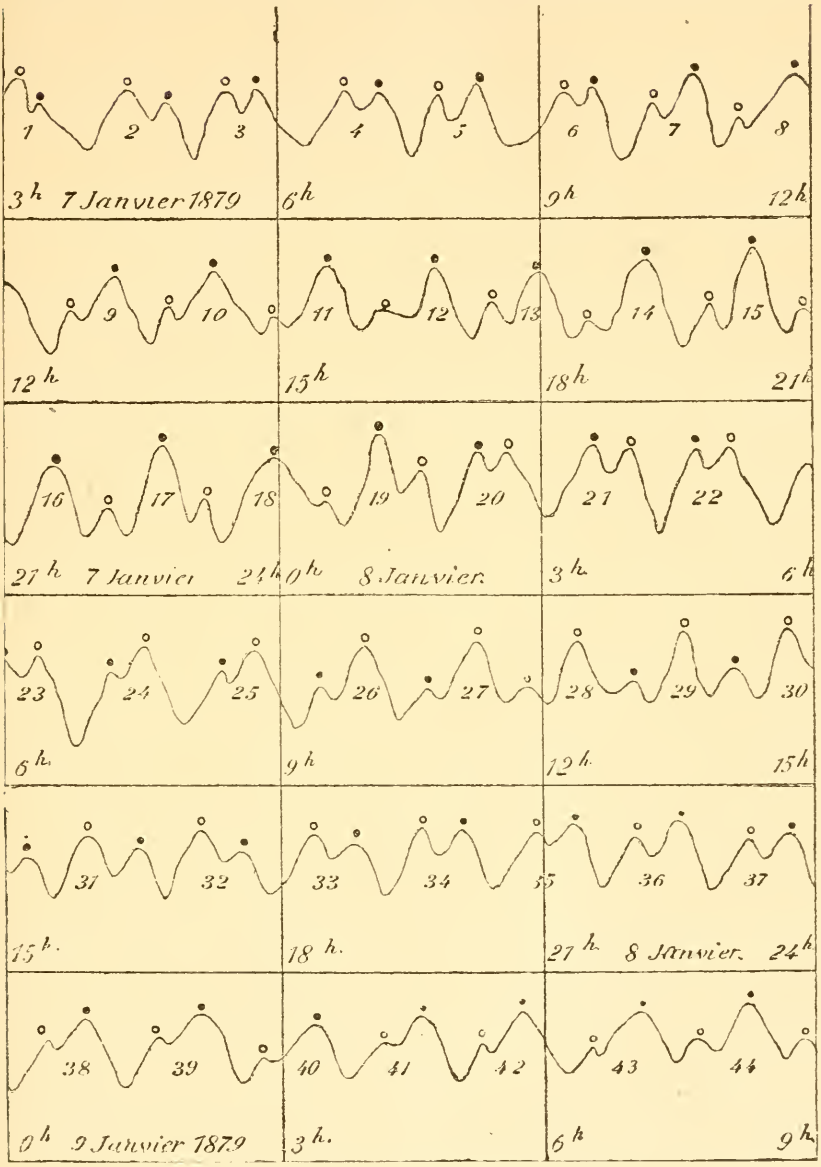
En analysant les tracés, j'ai bientôt reconnu que l'alternance entre les deux oscillations de hauteur différente qui constituent la seiche dicrote n'a pas toujours lieu dans les mêmes conditions ; si nous appelons onde principale la plus haute, onde secondaire la moins haute, il y a déplacement progressif de l'onde accessoire sur l'onde principale ; ce déplacement a lieu toujours dans le même sens, l'onde accessoire avance sur l'onde principale.

Illustrons cet énoncé par un exemple. Dans la figure 68 j'ai réduit au $^1/_5$ une partie d'un tracé de seiches dicrotes de Sécheron, ce qui donne une vitesse d'enregistrement de 12^{mm} par heure ; j'ai désigné les ondes alternantes par deux marques, l'une, les ondes paires par un petit cercle blanc, l'autre, les ondes impaires par un cercle noir. Si je prends la courbe le 7 janvier, à 7^h, je vois à la seiche désignée par le n° 4 les deux ondes former deux sommets égaux de hauteur, puis dans les seiches 5 à 10, l'onde paire fonctionner comme onde secondaire, et se déplacer en descendant progressivement sur le flanc postérieur de l'onde impaire ; dans le creux qui sépare les seiches 10 et 11, l'onde paire se loge comme onde secondaire ; dans les seiches 12 à 20, l'onde paire, onde secondaire, se déplace en remontant sur le flanc antérieur de l'onde principale (onde impaire) ; enfin, à la seiche 21, les deux ondes forment deux sommets égaux comme nous l'avions vu à la seiche 4, mais avec la différence que, dans la seiche 4, c'était l'onde impaire qui était la première, dans la seiche 21, c'est l'onde paire. Le même phénomène de déplacement se reproduit de l'onde 21 à l'onde 34, comme nous l'avons vu dans la première période, avec cette différence que l'onde impaire qui était l'onde principale dans la première période, est devenue l'onde secondaire dans la seconde période. Après cette double période, le tableau reprend comme devant, et l'onde 34 est semblable ou analogue à l'onde 4, l'onde 35 à l'onde 5, et ainsi de suite.

Ce déplacement relatif des deux ondes se retrouve dans tous les tracés de seiches dicrotes ; il a toujours lieu dans le même sens ; les périodes de révolution qui ramènent les mêmes rapports entre onde principale et onde secondaire sont toujours de même durée. C'est au bout de 15 ou 16 ondes doubles que se fait la demi-révolution, c'est au bout de 30 ou 32 que la courbe recommence son cycle identique.

Comment interpréter ces allures qui se reproduisent toutes les fois qu'il y a seiche dicrote, quelle que soit la hauteur relative des deux

ondes, qui se continuent parfois imperturbablement pendant plu-



(Fig. 68.) Série de seiches dicrotes de Genève (limnographe Plantamour) 1 5me grandeur naturelle ; 12mm par heure.

sieurs jours de suite ? J.-L. Soret, de Genève, en a donné l'explica-

tion [1]. Un tel tracé est produit par l'interférence de deux ondes, dont l'une est un peu plus courte que la moitié de la plus longue. L'onde principale résulte de la superposition de deux seiches hautes, du sommet de l'uninodale et du sommet de celle des binodales qui coïncide plus ou moins avec l'uninodale (n'oublions pas qu'il y a deux binodales pour chaque uninodale); l'onde secondaire est produite par le sommet de celle des binodales qui alterne avec la première, ou qui alterne avec l'uninodale.

Soret l'a prouvé d'une manière parfaitement démonstrative en traçant une épure de deux systèmes de sinusoïdes dans les proportions indiquées, et en en faisant dessiner la courbe résultante (planche II du mémoire cité). Il a obtenu des courbes dicrotes, parfaitement identiques à celles que nous donne le lac. En faisant varier les proportions relatives des deux systèmes de sinusoïdes, il a eu toutes les variétés de forme que nous offrent les seiches dicrotes des tracés de Sécheron.

Soret nous a indiqué un moyen de calculer, d'après le nombre de seiches dont se compose la période de révolution des dicrotes, le rapport de durée entre les deux systèmes d'ondes.

Si t est la durée de l'onde principale,

t' — — secondaire,

n est le nombre de seiches principales dans la période.

$$t' = \frac{t \times n}{2n + 1}$$

Dans le cas des seiches dicrotes de Genève où $t = 74.0^{\text{min}}$ et $n = 16$:

$$\frac{74.0 \times 16}{33} = 35.9^{\text{min}}$$

Pour les dicrotes de Morges, la durée des deux ondes interférentes est à peu près 10^{min} et 5^{min}. Mais je n'en possède pas de série assez longue pour que j'aie pu apprécier le taux du déplacement des deux ondes, si déplacement il y a. Je ne puis donc en donner la durée relative.

Nomenclature.

Dans notre hypothèse que les seiches sont des vagues de balancement du lac, nous pouvons établir les définitions et termes suivants :

[1] *Soret* et *Forel*. Les seiches dicrotes [loc. cit. p. 64 n° 20].

I. Le *plan d'oscillation* est le plan vertical, droit ou courbe, suivant lequel l'eau prend son mouvement de balancement.

II. Le mouvement de balancement des seiches se développe suivant les deux axes principaux d'un lac qui deviennent des plans d'oscillation, et l'on a deux systèmes de seiches :

A. Les *seiches longitudinales*, dont le plan d'oscillation est l'axe longitudinal du lac.

B. Les *seiches transversales*, dont le plan d'oscillation est l'axe transversal du lac.

III. Les seiches étant des vagues de balancement, on doit y retrouver :

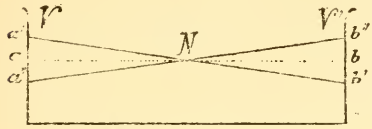
A. Des *ventres* d'oscillation, soit les parties du lac où l'eau subit des dénivellations verticales.

B. Des *nœuds* d'oscillation, soit les parties ou lignes du lac où la dénivellation verticale est nulle, et où le déplacement horizontal est maximal.

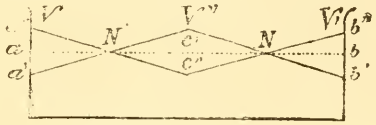
Dans chacun des systèmes de seiches, les longitudinales et les transversales, nous pouvons trouver les types suivants :

a Seiches uninodales, fig. 69, avec deux ventres terminaux V et V', et un seul nœud médian N.

b Seiches binodales, fig. 70, avec trois ventres, dont deux terminaux



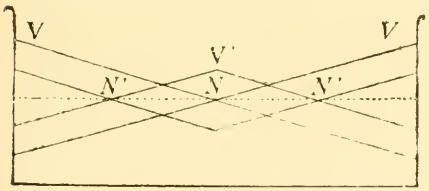
(Fig. 69.) Seiches uninodales.



(Fig. 70.) Seiches binodales.

V et V', et un médian, V'', et deux nœuds au 1er et au 3e quarts de la longueur du lac, N, N.

c Type composé d'uninodale et de binodales interférant ensemble, et donnant en dehors des lignes nodales de chacun des deux types, constituant la courbe compliquée, des seiches *dicrotes*. La figure 71 montre cette superposition des deux ondes de balancement. En V et V sont les ventres terminaux à la fois des uninodales et des binodales ; en V', le ventre médian des binodales, qui est en même temps le point nodal, N, des uninodales ; en N' N', les nœuds des binodales. — Sur

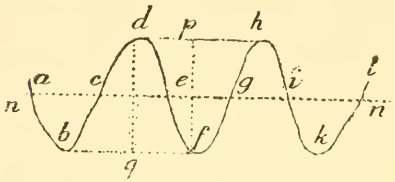


(Fig. 71.) Seiches composées, uninodales et binodales.

les lignes nodales de l'un des mouvements simples, il n'y a que l'autre mouvement qui soit apparent par des dénivellations verticales ; partout ailleurs, il y a interférence des deux mouvements et par conséquent dicrotisme plus ou moins évident.

Dans les dénivellations de l'eau, telles qu'on les observe en particulier sur les tracés limnographiques, j'appelle :

Seiche, la dénivellation entière de l'eau qui revient au même point homologue après avoir parcouru toute l'oscillation ; soit, fig. 72, *n n* le niveau moyen de l'eau : *abdfhkl*, le tracé d'une série de seiches, *bcdef*..... *cdefg*..... *defgh*, etc., seront des seiches entières. *a* et *e*..... *b* et *f*..... *c* et *g*..... *d* et *h*, etc., seront des *points homologues*.



(Fig. 72.) Tracé limnographique de seiches.

Demi-seiche, la moitié d'une oscillation, soit dans la fig. 71 *abc*.... *bcd*..... *def*, etc.

Seiche haute, la demi-seiche qui s'élève au-dessus du plan moyen : *cde*... *ghi*, etc.

Seiche basse, la demi-seiche qui s'abaisse au-dessous du plan moyen de l'eau : *abc*..... *efg*....., etc.

Seiche ascendante, la demi-seiche qui s'étend du minimum au maximum, pendant que l'eau monte : *bd*..... *gh*...., etc.

Seiche descendante, la demi-seiche qui s'étend du maximum au minimum, pendant que l'eau descend : *df*.... *hk*, etc.

La *durée* de la seiche 2 *t*, est le temps qui s'écoule entre le retour de l'eau à deux points homologues, soit la durée de la seiche entière.

La *hauteur* (1) de la seiche est la hauteur de la dénivellation entre le point maximum et le point minimum dans une seiche entière : *dq*... *pf*...., etc.

Enfin j'appelle *série de seiches*, l'ensemble des seiches de hauteur décroissante, qui se développent sous une impulsion unique, depuis la première seiche, de hauteur maximale, jusqu'aux dernières où la hauteur arrive à zéro. Les séries de seiches sont le plus souvent interrompues par l'apparition d'une nouvelle série.

(1) Je préfère ce mot de hauteur à celui d'amplitude que j'ai employé, dans le même sens, dans mes mémoires antérieurs sur les seiches.

Description des seiches principales du lac Léman.

1er SYSTÈME. SEICHES LONGITUDINALES

Leur plan d'oscillation s'étend dans le grand axe du lac, de Villeneuve ou Chillon, à Genève. Cet axe n'est pas rectiligne, mais courbe. Sa longueur est de 72.3km environ.

La profondeur maximale du lac est de 309.7m, la profondeur moyenne de 152.7m, la profondeur moyenne de l'axe courbe, 170m.

Nous avons reconnu dans ce système les types de seiches suivants :

1° Les longitudinales uninodales.

2° — — binodales.

3° — — dicrotes.

Quant à des plurinodales, qui existent certainement, nous ne les avons pas encore reconnues avec assez de certitude pour en décrire les caractères.

1er type. Seiches longitudinales uninodales.

Ce sont les plus grandes et les plus belles seiches du Léman ; ce sont les plus belles seiches connues, ou du moins étudiées.

Elles sont rares à l'état de pureté aux extrémités du lac, à Genève, par exemple ; le plus souvent elles sont compliquées par l'interférence de binodales, et sont alors affectées de dicrotisme. Nous en avons cependant des exemples très parfaits, (fig. A pl. V, page 105). A Morges, où les uninodales sont toujours très simples, et ne sont jamais altérées par des binodales, elles sont trop peu hautes pour que leur étude y soit facile.

Je vais en étudier la durée et la position des ventres et nœuds. Quant à leur hauteur, je renverrai cette étude après celle des binodales et des dicrotes, parce que ces trois types étant le plus souvent mal distingués dans les observations qui ne sont pas limnographiques, nous aurions à négliger un grand nombre de faits importants, si nous ne voulions étudier la hauteur que dans les seiches de type bien défini.

Les seiches uninodales sont bien représentées dans le Petit-lac, où leur maximum est à Genève, et dans le Haut-lac, où leur maximum est à Chillon et Villeneuve. Elles sont nulles ou à peu près nulles dans la région de la barre de Promenthoux.

A. La *durée* des seiches longitudinales uninodales s'étudie sur les tracés des enregistreurs. Voici quelques séries qui me donnent les éléments de ce calcul.

Début de la série.			Nombre de seiches.	Durée totale.	Durée d'une seiche entière.
25 mai	1876	10^h	22	27^h	73.6^{min}
29 —	—	11	23	28	73.0
22 avril	—	2	34	41	72.4
26 novembre	—	16	37	45	73.0
20 février	1877	17	68	83	73.2
25 novembre	—	1	84	6200^{min}	73.8
24 janvier	1879	9	99	7300	73.7
24 —	—	18	96	7080	73.75
21 mars	1880	3	38	2805	73.52
25 —	—	21	24	1752	73.0

De ces chiffres, j'ai tiré la durée moyenne de la seiche longitudinale uninodale du Léman, qui est à peu de chose près de 73.5^{min}.

Mais je constate que dans ces chiffres il y a des différences allant de 72.4^{min} à 73.8^{min}, soit un écart de -1.1^{min} à $+0.3^{min}$. D'où proviennent ces irrégularités ? — Ou bien de fautes d'observations : il n'est pas toujours très facile de mesurer exactement le sommet d'une seiche ; ou bien d'irrégularités dans la marche des seiches : les seiches qui se succèdent présentant des différences assez notables de durée. Ainsi, par exemple, dans la belle série des seiches du 26 mars 1891, voici la durée de quelques seiches mesurées sur les tracés du limnographe de Sécheron :

12e seiche,	27 mars	11^h42^{min}	durée :	78^{min}
13e —	—	13.0	—	71
14e —	—	14.11	—	78
15e —	—	15.29	—	75
16e —	—	16.44	—	67
17e —	—	17.51	—	78
18e —	—	19.9	—	73
19e —	—	20.22	—	74
20e —	—	21.36	—	68
21e —	—	22.44	—	77
22e —	28 mars	0.1	—	69
23e —	—	1.10		

J'ai choisi cet exemple au début de la série, alors que les sommets des seiches, très aigus, permettaient une détermination très précise de l'instant du maximum. Mais comme il y avait au commencement de la série encore certaines irrégularités, avant que le mouvement de balancement fût bien établi, je donnerai un autre exemple, pris dans la même série, à partir de la 88e seiche, alors que les sinusoïdes étaient aussi parfaites que possible.

88e seiche,	31 mars	3^h11^{min}	durée :	77^{min}
89e —	—	4.28	—	71
90e —	—	5.39	—	72
91e —	—	6.51	—	76
92e —	—	8.7	—	75
93e —	—	9.22	—	75
94e —	—	10.37	—	73
95e —	—	11.50	—	72
96e —	—	13.2	—	75
97e —	—	14.17		

Ainsi donc, malgré les belles allures de l'oscillation à ce moment de la série, il y a encore certaines irrégularités qui peuvent expliquer les différences de durée moyenne que nous avons constatées. Une autre cause encore de ces différences peut être cherchée dans l'intervention de traces de dicrotisme qui doivent dans certains cas déplacer légèrement l'instant du maximum ou du minimum de la seiche.

Cela étant, ne serait-il pas plus sûr de nous en tenir, pour déterminer la durée de la seiche longitudinale du Léman, à une seule mesure faite dans les meilleures conditions possibles ? Dans la magnifique série des seiches du 26 mars 1891, je trouve les données suivantes : du 27 mars, 3^h1^{min} au 3 avril, 6^h32^{min}, il s'est écoulé 171^h31^{min}, soit $10\,291^{min}$. Pendant ce temps, il y a eu 139 seiches longitudinales uninodales. Cela donne à la seiche entière une durée de 74.0^{min}.

Très étonné de la durée que j'obtenais dans cette série, notablement plus forte que celle des observations précédentes, je l'ai décomposée en sections qui m'ont donné des résultats assez concordants :

De la 1re	à la 17e,	durée moyenne	74.0^{min}
17	37	—	74.3
37	56	—	73.9
56	76	—	73.6
76	95	—	74.0

De la 95e à la 115e, durée moyenne 74.1min
115 134 — 74.1
ou, en résumé, de la 1re à la 139e — 74.0

Cette série étant, de toutes, celle qui m'offre les meilleures conditions de sécurité, c'est ce chiffre, 74min, que j'allais adopter pour la durée de la seiche longitudinale uninodale du Léman. Mais je constatai bientôt qu'il ne cadre pas avec l'ensemble des observations; ordinairement les seiches ont moins de 74min; quand j'appliquai cette valeur au calcul des binodales par le moyen des seiches dicrotes (procédé Soret, p. 116), j'arrivai pour les binodales à une durée de 35.9min, qui est aussi trop forte.

Je cherchai alors s'il n'y aurait pas eu dans les circonstances mêmes de ces seiches du 26 mars 1891 l'explication de cette divergence. Je reconnus qu'elles avaient eu lieu à l'époque des basses eaux, que le lac était à $ZL + 1.09^{m}$, soit à 30^{cm} au-dessous de la moyenne actuelle, et j'essayai de calculer la correction que cette différence de hauteur, quelque faible qu'elle fût, devait apporter à la durée des seiches. Dans le tableau que je vais donner du calcul des seiches longitudinales du Léman par le procédé du Boys, je diminuai les profondeurs de chacun des éléments de 30^{cm}, et j'obtins en définitive pour la durée de la seiche uninodale une durée de 16 secondes plus longue que celle que j'avais primitivement eue. La correction que j'ai donc à apporter à la durée des seiches du 26 mars 1891, pour la rapporter à celle des seiches par les eaux moyennes, est donc de 0.3min, et le chiffre de 74.0min est abaissé à 73.7min, ce qui est suffisamment conforme avec les valeurs ci-dessus déduites.

Je m'en tiendrai donc à la durée de 73.5min donnée par la moyenne des observations que j'ai utilisées, et en l'arrondissant à 73min, je continuerai à appeler seiches de 73 minutes les longitudinales uninodales du Léman.

Appliquons maintenant à ces seiches longitudinales du Léman la formule de M. P. du Boys (formule 14, p. 83). Je vais donner en tableau l'exemple complet du calcul qui se décompose dans les opérations suivantes : On trace sur la carte hydrographique l'axe probable du mouvement de balancement de l'eau le long du thalweg du lac. On partage cet axe en un nombre assez grand d'éléments, pour que l'on puisse admettre que chacun d'eux a un fond plat; pour chacun de ces éléments, on mesure sa longueur l, puis sa profondeur h' et h''

aux deux extrémités ; on prend la racine carrée de h' et de h''. On prend la moyenne de ces racines $\frac{\sqrt{h'}+\sqrt{h''}}{2}=\sqrt{h}$

On divise l par cette moyenne, et l'on obtient une valeur $\frac{l}{\sqrt{h}}$;

on additionne les valeurs successives de $\frac{l}{\sqrt{h}}$;

le total, on le divise par $\sqrt{g}=3.132$;
et l'on obtient la valeur de t pour la durée d'une demi-seiche.

Dans le tableau suivant, que j'ai simplifié autant que possible, les numéros des profils sont comptés à partir de Genève.

éléments Nos des profils	longueur l	profondeur h'	 h''	$\sqrt{h'}$	$\sqrt{h''}$	$\sqrt{h}$	$\frac{l}{\sqrt{h}}$	totaux successifs
	m	m	m	m	m	m		
0—1	2100	3	20	1.73	4.47	3.10	677	677
1—2	5500	20	60	4.47	7.75	6.11	900	1577
2—3	15500	60	70	7.75	8.31	8.03	1930	3507
3—4	7250	70	160	8.31	12.65	10.43	695	4202
4—5	10900	160	300	12.65	17.32	14.99	727	4929
5—6	12000	300	300	17.32	17.32	17.32	693	5622
6—7	7600	300	240	17.32	15.49	16.40	463	6085
7—8	6300	240	160	15.49	12.65	14.07	448	6533
8—9	3100	160	120	12.65	10.95	11.80	263	6796
9—10	2200	120	70	10.95	8.31	9.63	228	7024
10—11	1250	70	0	8.31	0	4.16	300	7324
Totaux.	73700						7324	

La somme des produits $\frac{l}{\sqrt{h}}$ est 7324 ; en la divisant par $\sqrt{g}$ nous obtenons 2338 secondes, durée de la demi-seiche, ce qui donne 4676 secondes, soit 77.9^{min} pour la seiche entière. Ce chiffre est suffisamment rapproché de celui que nous a donné l'expérience ; il est pour nous une preuve d'une part de l'excellence de la formule de M. du Boys, d'autre part de la justesse de nos idées sur la nature des seiches. Les seiches sont bien les vagues de balancement de l'eau, puisque la formule qui donne leur durée en fonction de la profondeur et de la longueur du bassin s'applique aux valeurs d'observation de la seiche longitudinale uninodale du Léman.

La formule de M. du Boys n'est cependant pas d'une application très facile : l'irrégularité du bassin d'un lac est telle que l'on peut se trouver souvent embarrassé pour la direction à prendre ; il est évident, en effet, qu'il ne faut pas suivre fidèlement la ligne du thalweg, soit l'axe souvent compliqué qui donne les plus grandes profondeurs ; dans son balancement, la masse d'eau doit chercher la ligne des plus courtes distances. Quelle est la ligne qui doit représenter l'axe du balancement des seiches ? C'est, sur le Léman, fort difficile à dire dans plusieurs points. C'est tellement vrai, que j'ai répété plusieurs fois l'établissement du tableau de la durée des seiches d'après le procédé de M. P. du Boys, et que je suis toujours arrivé à des résultats numériques assez différents. Je ne citerai les résultats que de deux de ces calculs. Le premier m'a été donné par M. du Boys lui-même ; il avait divisé le lac en 22 éléments, et il avait trouvé pour la durée des seiches du Léman une valeur de 74.6^{min}, qui se rapproche de très près du chiffre donné par l'expérience. Le second, c'est le calcul où j'ai le plus multiplié les précautions, en divisant la longueur du lac en 46 éléments, limités là où cela était nécessaire par des différences de profondeur de 10 et même de 5 mètres seulement ; dans ce calcul, j'ai obtenu pour chiffre définitif 77.4^{min}, valeur qui s'éloigne un peu moins du résultat expérimental que le calcul développé plus haut.

Ces divergences montrent la difficulté d'application de la formule de M. du Boys ; elles n'en attaquent pas la légitimité.

B. La *position du nœud.* Où est situé le nœud de la seiche longitudinale uninodale ? A cette question, la même réponse est donnée par l'expérience et par la théorie.

Les seiches uninodales de 73^{min} sont visibles sur les tracés des limnographes de tout le lac, excepté sur ceux de Rolle, de Fleur d'Eau, près Rolle, de Thonon et de Séchex, près Anthy, où elles sont si faibles et si mal dessinées qu'on peut presque les dire absentes. Cette première constatation suffit pour nous faire affirmer que le nœud de ces seiches est près de ces stations, soit dans la partie occidentale du Grand-lac. Cette supposition est confirmée par trois faits.

a. Les seiches de 73^{min} sont synchrones et de même sens dans les diverses stations du Petit-lac, Genève, le Rivage, Bellevue, qui ont été étudiées par les limnographes Plantamour et Sarasin.

b. Les seiches de 73^{min} sont synchrones et de même sens dans les diverses stations du Grand-lac, à partir de Morges jusqu'à Villeneuve.

Nous l'avons établi par une comparaison des tracés limnographiques Forel et Sarasin dans les stations de Morges, la Tour-de-Peilz, Chillon. J'en avais donné une première démonstration le 8 janvier 1877 ; après avoir reconnu que mon limnographe de Morges dessinait automatiquement une belle série de seiches de 73^{min}, je me suis rendu à Vevey, et là, de 14^h30^{min} à 17^h, j'ai suivi de cinq en cinq minutes les dénivellations du lac telles que me les montrait le limnimètre de l'Eperon de l'Aile. Un tableau graphique que j'ai construit avec ces valeurs m'a montré les mêmes oscillations qu'à Morges ; j'ai pu les superposer et constater leur parallélisme, leur synchronicité et la similitude de leur direction. (1)

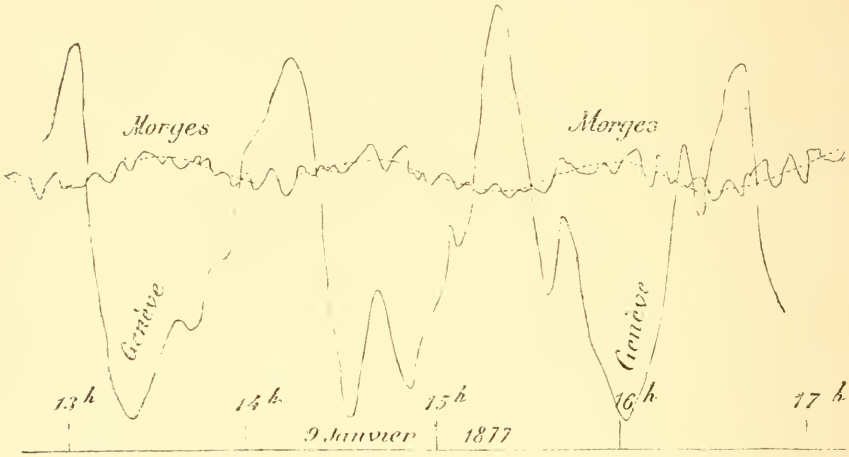
c. Les seiches de 73^{min} sont synchrones, mais opposées de mouvement ou de direction, à Morges et à Genève. C'est ce qui résulte de la comparaison que j'ai pu faire, pendant plusieurs années, entre les tracés limnographiques de Morges et ceux de Sécheron (Genève). C'est ce qui résultait déjà de la première observation où j'avais pu constater le phénomène. Qu'on me permette de la relater ici en détail ; elle a un certain intérêt historique, car c'est la première observation suffisamment complète qui ait démontré la justesse de ma théorie des seiches. C'était le 9 janvier 1877 ; j'avais, la veille, constaté la similitude du mouvement à Vevey et à Morges ; la série des seiches continuait à osciller avec régularité, et à dessiner au limnographe de Morges des ondulations parfaitement reconnaissables. Je partis pour Genève et de 13^h à 17^h, je suivis de deux minutes en deux minutes les variations du limnimètre à flotteur du Jardin-Anglais. Je traçai d'après ces valeurs numériques la courbe graphique des dénivellations de Genève, et je la superposai à la courbe automatique du limnographe de Morges (fig. 73). J'obtins une opposition générale très évidente des mouvements ; malgré la différence de hauteur des oscillations de l'eau, malgré la complication des broderies secondaires, il était évident que les énormes seiches de 73^{min} de Genève alternaient avec les seiches surbaissées, mais de même durée, de Morges ; les grands maximums de Genève avaient lieu au même moment que les minimums de Morges, les minimums de Genève étaient synchrones avec les maximums de Morges.

(1) Essai monographique sur les seiches du Léman [loc. cit. p. 63, n° 8]. pl. II, fig. 3.

Ainsi donc : absence de seiches de 73min à Rolle et Thonon, présence de ces seiches dans le Petit-lac d'une part, dans le Grand-lac, à l'orient de Morges d'autre part, enfin, opposition du mouvement avec synchronisme parfait dans les deux moitiés du lac à l'occident et à l'orient de la ligne Thonon-Rolle. Le nœud des uninodales est sur cette ligne, ou près d'elle ; le ventre occidental occupe le Petit-lac, le ventre oriental occupe le Grand-lac.

Voilà ce que nous apprend l'expérience. Que va nous dire le calcul théorique ?

Le tableau des seiches du Léman de la page 123, dressé d'après la formule et le procédé de M. P. du Boys, nous amène au même résultat.

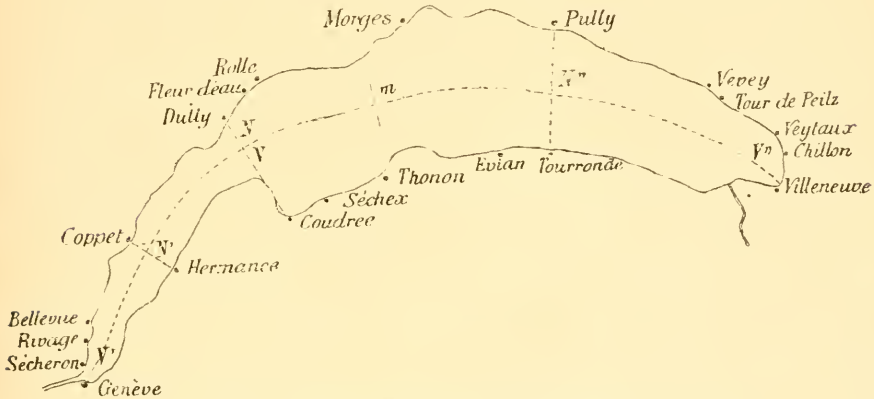


(Fig. 73.) Synchronisme et opposition des seiches longitudinales uninodales ; Genève et Morges.

Ainsi que nous l'avons exposé, page 84, le point nodal se trouve au lieu de rencontre de deux vagues, l'une, la vague d'aller, l'autre, la vague de retour, après réflexion contre l'extrémité du bassin, qui viennent interférer l'une avec l'autre ; et dont les deux dénivellations de signe contraire s'annulent absolument. Quand le bassin est de profondeur uniforme, ou symétrique par rapport à son plan médian, la vitesse de propagation des vagues est la même dans les deux moitiés du bassin, et leur point de rencontre est au milieu de la longueur ; mais quand il y a inégalité dans la profondeur, la vitesse est ralentie sur les parties peu profondes, et le point nodal est déplacé. L'on peut par le calcul chercher le lieu de rencontre des deux vagues, c'est le

point où aboutiraient deux ondes partant simultanément de chacune des extrémités du lac, ou ce qui revient au même, le point où l'onde partie de l'une des extrémités arrive dans la moitié du temps nécessaire au parcours de la longueur totale du bassin.

Prenons dans le tableau de la page 123 la somme des produits $\frac{l}{\sqrt{h}}$ soit 7324 ; divisons ce nombre par 2, nous obtenons 3662. Cherchons quel est, dans les totaux successifs, celui qui correspond à ce chiffre 3662, nous trouvons que c'est dans l'élément limité par les profils 3 et 4, au quart de la longueur de cet élément. Cherchons quel est ce point sur la longueur du lac. J'utilise pour cela le tableau plus



(Fig. 74.) Ventres et nœuds des seiches longitudinales du Léman.

complet dont j'ai parlé à la page 124, dans lequel j'ai divisé le lac en 46 éléments, et je trouve la ligne nodale sur l'axe du lac, au point de rencontre de la ligne transversale Dully-Coudrée, ou à 3.5^{km} à l'est de la barre de Promenthoux (voir fig. 74, N). C'est assez près de la ligne séparative, entre le Grand et le Petit-lac, un peu plus à l'est : c'est assez près, un peu plus à l'ouest, de la ligne transversale Rolle-Thonon, où nous avons vu les seiches de 73^{min} être presque nulles. Le nœud est donc entre Rolle, Thonon et le détroit de Promenthoux. S'il y a des seiches uninodales à Thonon et à Rolle, elles sont opposées à celles de Genève, et de même direction que celles de Morges.

Le nœud des uninodales n'est donc pas situé au milieu de la longueur du lac, au point *m*, fig. 74, qui, comme nous l'avons dit [1], est

[1] T. I. p. 26.

à peu près devant la pointe de Coulet, près de St-Prex; le nœud est à 12km à l'occident de ce milieu de la longueur du lac; il est de 24km plus rapproché de Genève que de Villeneuve. Le ralentissement de la propagation de l'onde, par le fait de la faible profondeur du Petit-lac, est tel, que la vague met autant de temps pour parcourir les 24km de Genève à Promenthoux, que les 48km de Promenthoux à Villeneuve.

Ce déplacement du nœud des seiches, qui se rapproche de l'extrémité la moins profonde du lac, correspond-il aux faits que nous avons reconnus dans l'oscillation de balancement du lac dans nos bassins d'expérience? Nous n'avons pas dans nos auges d'expérimentation cherché la position des nœuds de balancement; l'observation eût été difficile et les résultats incertains. J'estime cependant que c'est une conséquence nécessaire de notre VIe loi, p. 72. Cette loi dit : « Dans un bassin dont le fond est incliné, la hauteur de la vague est plus forte à l'extrémité où l'eau est la moins profonde. Or, si nous admettons, — cela n'a pas besoin de démonstration, — que la masse d'eau déplacée au-dessus et au-dessous du niveau d'équilibre de l'eau est égale dans les deux ventres des deux côtés du nœud de balancement si la vague, dans un bassin à bords parallèles, est plus élevée dans un ventre que dans l'autre, la longueur du premier ventre doit être plus faible que celle du second. Donc si, dans mon auge à fond incliné, je constatais une vague plus haute dans la partie où l'eau était moins profonde, je puis être sûr qu'en y recherchant la position du nœud de balancement, je l'aurais trouvé rapproché de cette dernière extrémité.

Les faits d'observation des seiches dans le lac et les faits d'expérimentation dans une auge où je mets l'eau en mouvement de balancement concordent donc bien, même aussi pour ce point de détail, et notre théorie des seiches est ainsi confirmée.

C. Hauteur des seiches uninodales. Ainsi que je l'ai dit, page 119, je renvoie à un paragraphe ultérieur l'étude de ce caractère des seiches uninodales, quand je pourrai considérer en même temps les divers types de seiches longitudinales.

2e type. Seiches longitudinales binodales.

De même que les uninodales, les binodales sont rarement simples et pures de mélange; elles interfèrent le plus souvent avec les unino-

dales. Dans les stations des extrémités terminales du lac, où les ventres des deux types coïncident, il est très rare qu'il n'y ait pas un dicrotisme plus ou moins marqué ; nous en avons cependant des exemples (pl. V, fig. *D*). En revanche, dans la région occidentale du Grand-lac, en particulier dans les stations de Rolle et de Thonon qui sont très rapprochées du ventre médian des binodales, et en même temps du nœud des uninodales, nous avons les courbes des binodales très correctes, on peut dire sans trace de dicrotisme (pl. V, fig. *G*, page 105).

Nous rechercherons, comme pour les uninodales, la durée et les points nodaux de ce type de seiche.

A. Durée. Les séries de binodales franches et pures de dicrotisme sont trop rares et trop courtes dans les ventres terminaux, à Genève et dans le Haut-lac, pour que nous puissions, avec fruit, y étudier la durée exacte des seiches. En revanche, à Thonon et à Rolle, nous avons de longues et belles séries qui nous permettent de la mesurer.

Seiches de Thonon (limnographe des Ponts et Chaussées).

17 novembre	1880	11^h56^{min}	15 seiches	Durée moyenne	35.7^{min}
17 août	1880	16.26	45 —	—	35.6
3 octobre	1888	21.24	28 —	—	35.5

Seiches de Rolle, station de Fleur d'Eau (M. Ed. Sarasin).

17 novembre	1880	3.13^{min}	44 seiches	Durée moyenne	35.3^{min}
23 décembre	1880	7^h32	27 —	—	35.6
5 janvier	1881	22.17	24 —	—	35.7

La durée des seiches bidodales, telle qu'elle résulte de l'expérience directe, est donc de 35.5 ou 35.6^{min}. C'est, du reste, la même valeur à laquelle M. Ed. Sarasin est arrivé par l'étude des seiches de la Tour-de-Peilz. (1)

C'est la même valeur que nous a donnée le calcul déduit des allures des seiches dicrotes. Nous avons vu, p. 113, que les seiches dicrotes sont dues à l'interférence de seiches uninodales et de seiches binodales ; que l'onde secondaire qui brode l'onde principale, laquelle correspond à l'uninodale, est due au dégagement des binodales de deux en deux vagues ; que l'onde secondaire se déplace en avançant sur l'onde principale ; que ce déplacement périodique ramène la position primitive au bout de 15 à 16 seiches ; que si nous admettons ce

(1) *Ed. Sarasin*, [loc. cit. p. 63, n° 19]. p. 732.

dernier nombre 16, il y a pendant 16 seiches uninodales, $(16 \times 2) + 1$, soit 33 seiches binodales. Que par conséquent, de la durée moyenne de 73.5^{min} des seiches uninodales du Léman, nous pouvons tirer la durée des seiches binodales qui est 35.5^{min}.

C'est exactement la même valeur que nous a donnée la mesure directe. C'est celle que nous adopterons.

Cela nous amène à un résultat curieux et intéressant :

La durée de l'uninodale est 73.5^{min}.

La durée de la binodale est 35.5^{min}.

La binodale est donc plus courte que la moitié de l'uninodale qui serait 36.7^{min} : la différence 1.2^{min} est trop grande pour qu'il puisse y avoir là une erreur d'observation. Le rapport entre la durée des deux types de seiches sur le Léman est plus grand que 2.

$$\frac{t}{t'} > 2$$

Comparons ce résultat avec les notions que la théorie nous apprend. Nous avons dit, page 69, que la vague binodale devait avoir une durée égale à la moitié de l'uninodale; que l'on pouvait considérer le bassin, où oscillent des binodales, comme étant partagé en deux moitiés dans chacune desquelles oscille un système d'uninodales; que la valeur de la profondeur d'eau dans ces deux moitiés étant la même que dans l'ensemble du bassin, et la longueur étant la moitié du bassin entier, la durée de la binodale doit être exactement la moitié de la durée de l'uninodale. — C'est à la même conclusion qu'est arrivé M. du Boys, dans son mémoire de 1891. (1)

D'une autre part, nous avons vu (p. 84) que M. Ch. Soret, en développant la formule de Merian, arrivait pour la binodale, dans des bassins de faible profondeur, à une durée sensiblement plus longue que la moitié de l'uninodale.

Quand la profondeur h est infinie, le rapport $\frac{t}{t'} = 2$, t étant la durée de l'uninodale, t' celle de la binodale.

Quand la profondeur h est nulle $\frac{t}{t'} = \sqrt{2}$.

D'une autre part, enfin, nous avons dans notre auge d'expérimentation constaté que pour les faibles profondeurs d'eau $\frac{t}{t'} > 2$, tandis que pour les profondeurs plus considérables $\frac{t}{t'} < 2$.

(1) *P. du Boys*, [loc. cit. p. 64, n° 33].

Il y a donc ici discordance entre la théorie pure, la théorie mathématique, l'expérimentation en laboratoire et l'observation des seiches du Léman. Nous n'avons pas encore les éléments pour résoudre ces divergences, et nous nous bornerons à indiquer ici la solution qu'a proposée M. P. du Boys. (1)

« A quoi » dit-il « attribuer cette anomalie ? Existe-t-elle sur d'autres lacs plus réguliers que le Léman ? Les observateurs seuls pourraient répondre. Et nous ne serions pas étonnés que ce fût négativement. (2)

» En ce qui concerne le Léman, il nous paraît possible de trouver dans sa forme une explication. La normale d'Yvoire, qui serait le ventre médian des binodales en même temps que le nœud des uninodales, est un peu à l'ouest de la côte de Coudrée qui ferme partiellement le Grand-lac. Si cette côte se prolongeait jusque vers Dully et fermait le Grand-lac, on observerait dans le lac ainsi réduit des uninodales dont la période serait un peu plus courte que la période théorique des binodales du Léman entier.

» M. Forel avait d'abord songé à voir dans les seiches de 35^{min} des seiches propres du Grand-lac (3). Il a renoncé à cette idée quand il a reconnu que ces seiches affectent le Petit-lac. Nous serions portés à reprendre la première interprétation de M. Forel, en remarquant que les oscillations du niveau produites par ces seiches au détroit de Promenthoux forment des intumescences qui doivent se propager dans le Petit-lac.

» ..... Il semblerait qu'il doive y avoir sur le Léman deux espèces de seiches distinctes : de véritables seiches binodales à période de 36 $^1/_2$ à 37^{min} et des seiches uninodales du Grand-lac se propageant dans le Petit-lac à périodes de 35^{min}.

» Mais les secondes paraissent prédominer. Pourquoi ? — Les physiciens ont observé que quand deux mouvements oscillatoires, presque synchrônes, coexistent dans le voisinage l'un de l'autre, ils tendent à devenir tout à fait synchrônes. Ne peut-il en être ainsi dans le cas qui nous occupe ? Si une binodale de 37^{min} tend à se produire, une partie de l'onde du Grand-lac, arrêtée par la côte de Coudrée doit tendre à prendre l'allure d'une uninodale de 35^{min}. Et en raison

(1) *P. du Boys*, [loc. cit. p. 64, n° 33, p. 648].

(2) Nous verrons plus loin ce que nous apprend à ce sujet le lac de Constance.

(3) *F.-A. Forel*. Essai monographique [loc. cit. p. 63, n° 8], p. 67.

de la grande masse d'eau du Grand-lac, cette action doit être prépondérante et masquer l'allure propre du lac entier. »

J'avoue que je ne suis pas arrivé à me faire une opinion sur la réponse à donner à ce problème curieux et intéressant. J'indiquerai le jugement que porte M. Ed. Sarasin sur l'explication de M. du Boys, quand j'aurai parlé des binodales des autres lacs suisses.

B. Ventres et nœuds des binodales. Nous en trouverons la position, comme pour les uninodales, en consultant les tracés des limnographes.

Nous connaissons les binodales dans toutes les stations du Haut-lac où les seiches ont été étudiées, Chillon (Sarasin et Forel), Veytaux (Forel), Tour-de-Peilz (Sarasin), Vevey (H. Dufour). Nous avons là le ventre terminal oriental des binodales. C'est bien un ventre terminal, car les oscillations y sont synchrones à celles de Genève, et de même sens qu'elles, ainsi que M. Ed. Sarasin l'a démontré [1] en superposant ses tracés de la Tour-de-Peilz à ceux du Sécheron (limnographe Plantamour).

Nous les connaissons de même dans les stations du Petit-lac, près de Genève, à Genève, à Sécheron, au Rivage, à Bellevue (tracés limnographiques Plantamour et Sarasin). C'est bien là, conformément à la théorie, le ventre terminal occidental.

Quant au ventre médian, nous retrouvons les binodales très bien dessinées sur les tracés de Thonon (limnographe des Ponts et Chaussées français), de Fleur-d'Eau, près Rolle, (limnographe Sarasin), et même sur quelques tracés, pris avec le limnographe portatif Forel, à Séchex, près d'Anthy, par M. Raoul Pictet, et à Rolle par moi-même. L'extrémité occidentale du Grand-lac est donc sur le ventre médian des binodales, ce n'est pas à dire que ces stations soient situées sur son sommet.

A Morges, au contraire, je ne les ai jamais vues sur les tracés limnographiques ; nous serions donc, dans cette station, sur un nœud ou près d'un nœud ; d'après la position du ventre médian près de Rolle, Morges serait sur le nœud oriental.

Quand au nœud occidental, qui doit se trouver entre Rolle et Genève, nous n'avons pas de tracé limnographique qui nous permette d'en déterminer expérimentalement la situation.

Suffisamment d'accord avec ces faits d'observation, voici ce que

[1] *Sarasin* loc. cit. p. 63, n° 19] p. 730).

nous apprend la théorie. Si par le procédé de M. P. du Boys que nous avons expliqué à propos du nœud des uninodales (p. 126), nous cherchons la position des points où les vagues de réflexion s'annulent par leur rencontre (nœuds), ou s'additionnent avec un effet maximal (ventres), dans le cas des binodales du Léman, nous les trouvons situés, voir fig. 74, p. 127 :

Nœud oriental, sur la ligne Pully-Tour ronde.

Ventre médian, sur la ligne Dully-Coudrée, au même point où est le nœud des uninodales.

Nœud occidental, sur la ligne Coppet-Hermance.

Si je mesure sur l'axe courbe du lac les distances de ces trois points aux deux extrémités du bassin, j'obtiens :

	distance orientale	distance occidentale
Nœud oriental	21^{km}	51^{km}
Ventre médian	$47\ ^1/_2$	$24\ ^1/_2$
Nœud occidental	60	12

Le quart de la longueur du lac sur l'axe courbe étant 18^{km}, et la moitié 36^{km}, nous voyons que le nœud oriental est reporté à 3^{km}, le ventre médian à $11\ ^1/_2{}^{km}$, le nœud occidental à 6^{km} à l'ouest de la position qu'ils auraient eue si le lac avait été un bassin régulier. Ce déplacement du côté de l'occident, dans la direction de Genève, des points principaux du balancement binodal tient à la figure du lac, moins profond dans le Petit-lac que dans le Grand-lac. Nous avons suffisamment développé ce fait à propos des uninodales.

La théorie et l'observation concordent bien encore ici dans tous les détails sauf un. De l'absence des binodales à Morges, j'avais conclu que cette station serait sur la ligne nodale orientale du lac; or, l'application du procédé du Boys nous apprend que cette ligne se trouve devant Pully, à 12^{km} plus loin que Morges, dans le sens du Haut-lac. De par la théorie, les seiches binodales devraient être visibles à Morges, faiblement dessinées, mais cependant apparentes. — Je viens de reprendre, à ce point de vue, mes tracés limnographiques de Morges; j'y ai cherché des indices de seiches de 35^{min}, aussi bien dans l'ensemble des tracés que spécialement les jours où je sais, par d'autres observations, qu'il y avait de belles binodales; avec la meilleure bonne volonté, je n'ai pas réussi à les reconnaître. Le plus souvent, les tracés de Morges sont trop compliqués par des oscillations plus courtes pour que ce résultat négatif soit bien étonnant;

mais il est des cas où il me paraît que j'aurais dû les voir, si elles avaient existé. Je ne sais pas expliquer cette anomalie.

C. Hauteur des binodales. Cette hauteur est au maximum à Genève ; elle est encore très forte dans les ventres médian et oriental ; elle est plus faible ou nulle près des nœuds et dans les nœuds.

Les binodales sont en général moins hautes que les uninodales ; dans les ventres terminaux où les deux seiches interfèrent, la binodale se dessine comme un accident de la courbe uninodale. Parfois cependant, la binodale est très bien accentuée, et de grande hauteur. Il n'y a aucune règle absolue pour cette hauteur relative.

Quant à la hauteur absolue et maximale des seiches binodales, nous ne pouvons pas, dans les grandes seiches historiques, la séparer de celle des uninodales. Nous en parlerons après avoir traité des seiches dicrotes.

Interférence des seiches longitudinales, uninodales et binodales. Seiches dicrotes.

Il est rare que les seiches longitudinales soient de type simple, ou uninodales ou binodales ; le plus souvent, il y a coexistence des deux types ; l'eau oscille simultanément en vagues de 73 et de 35^{min}, et ce double mouvement oscillatoire se continue en séries qui se prolongent pendant longtemps, jusqu'à 4 et 5 jours de suite.

J'ai constaté la coexistence de ces deux mouvements de l'eau par des tracés pris à l'aide de mon limnographe portatif, le 27 août 1878, à Séchex, près Anthy, en Savoie, et le 16 novembre de la même année à Rolle ; pendant que mon limnographe fixe de Morges dessinait de belles seiches longitudinales uninodales de 73^{min}, dans ces deux stations les tracés nous montraient des seiches de courte période, de 35^{min} de durée. Le même fait a depuis lors été vérifié à loisir sur les tracés de Thonon et de Fleur-d'Eau, près Rolle. D'un autre côté, l'étude des tracés limnographiques de Genève et de la Tour-de-Peilz a donné à MM. Plantamour et Sarasin la superposition des deux types de seiches sur les mêmes courbes. La théorie en a été faite complètement par J.-L. Soret dans sa Lettre sur les seiches dicrotes. (1)

S'il y a coexistence des uninodales et des binodales, la position des

(1) V. p. 113.

ventres et nœuds dans ces deux types étant différente, le mouvement résultant causé par l'interférence des deux vagues doit être différent d'une station à l'autre. En effet, dans un bassin régulier, d'une extrémité à l'autre, nous devons avoir les conditions suivantes :

1re extrémité du bassin. Sommet du ventre terminal des uninodales aussi bien que des binodales ; les deux oscillations y ont l'une et l'autre leur hauteur maximale.

1er quart du bassin. Moitié du ventre des uninodales, nœud des binodales. Les uninodales sont seules apparentes par des oscillations de faible hauteur.

2e quart du bassin. Nœud des uninodales, sommet du ventre médian des binodales. Les binodales seules sont apparentes par des oscillations de hauteur maximale.

3e quart du bassin. Comme le premier quart.

2e extrémité. Comme la première extrémité.

C'est à peu près ce qui a lieu pour les seiches du Léman ; mais en raison des irrégularités de la profondeur du bassin, moins profond dans le Petit-lac que dans le Grand-lac, conformément à ce que nous avons vu pour les types isolés, il y a deux modifications importantes à noter. D'abord, le déplacement des points principaux dans la direction de Genève ; ce n'est pas aux divers quarts de la longueur du lac, mais sensiblement plus près de l'extrémité occidentale, que sont placés les nœuds et les ventres des seiches. En second lieu, la différence de hauteur des seiches ; les mêmes seiches sont dessinées par des oscillations plus hautes dans les ventres occidentaux que dans les ventres orientaux.

Sur les lignes nodales des deux types de composantes, l'autre type de seiches se dessinant seul par des oscillations du niveau de l'eau, ces oscillations sont simples, comme nous l'avons vu à Morges et à Rolle. Nous n'avons rien à ajouter à ce que nous en avons dit dans les paragraphes précédents. En dehors de ces lignes nodales, les deux oscillations verticales interfèrent ensemble ; il y a production de seiches dicrotes. Nous ne répèterons pas la description que nous en avons donnée (p. 113), mais nous signalerons une différence notable suivant les régions du lac.

a. Sur la ligne nodale des uninodales, les seiches binodales sont simples ; si l'on s'éloigne de cette ligne nodale, on commence à voir apparaître les uninodales ; elles y sont de faible hauteur, et le dicro-

tisme y apparaît seulement par une légère irrégularité dans la hauteur des binodales successives ; de deux en deux, une des binodales est plus haute, l'autre est moins haute. C'est ce que nous voyons par exemple sur les tracés de Thonon.

b. Près des nœuds des binodales, le dicrotisme doit se montrer par une légère irrégularité, une asymétrie de la courbe des uninodales. C'est ce que j'aurais voulu retrouver sur les tracés de Morges (v. p. 133).

c. Aux deux extrémités du lac, là où coïncident à la fois le ventre des uninodales et celui des binodales, ces deux seiches sont à leur maximum de dénivellation, et leur interférence donne ces belles courbes dicrotes que nous avons étudiées. Suivant que c'est l'onde uninodale ou l'onde binodale qui est la mieux marquée, la courbe présente des apparences fort différentes ; toutes les combinaisons imaginables de hauteur relative sont possibles, et rien n'est plus varié que la collection des tracés des seiches dicrotes de Genève.

Hauteur des seiches longitudinales.

Nous pouvons considérer cette question à plusieurs points de vue.

1° *Hauteur relative des mêmes seiches dans le même ventre, mais dans deux stations différentes.* Nous possédons pour cette étude les tracés pris simultanément à Sécheron (Genève) par le limnographe Plantamour, et aux stations du Rivage et de Bellevue par le limnographe Sarasin. Les courbes sont parallèles, mais de hauteur différente. De 8 mesures prises sur des tracés simultanés, les 1 et 3 avril 1880, il résulte que si à Sécheron les seiches ont une hauteur de 10, au Rivage, elles ont une hauteur de 6. Des mesures analogues faites par M. Ph. Plantamour lui ont donné pour la hauteur relative des seiches, à Sécheron 10, au Rivage 8.8 (10 comparaisons), à Bellevue 8.6 (7 comparaisons).

De même, j'ai des termes de comparaison entre les tracés de Chillon et de Morges (limnographes Forel). La mesure de 8 demi seiches uninodales du 18 août 1878 me donne pour la hauteur relative des seiches, à Chillon 10, à Morges 4.

Cette différence de hauteur tient essentiellement à la position relative des stations par rapport aux ventres et nœuds ; les seiches ont leur hauteur maximale au sommet du ventre, elles sont de hauteur

nulle aux nœuds ; dans les stations intermédiaires, la hauteur est à peu près inversément proportionnelle à la distance du sommet du ventre.

2° *Seiches de la Machine hydraulique.* M. Ed. Sarasin a établi son limnographe à la Machine hydraulique de Genève, soit en tête de l'Ile, dans l'arrière-fond du port, en amont du barrage qui soutenait les eaux du lac (1) ; il l'y a fait fonctionner du 20 décembre 1879 au 1er mars 1880, du 11 mars au 21 juin 1881, et du 17 janvier au 28 février 1883. Une comparaison attentive avec les tracés simultanés de Sécheron lui a donné des faits intéressants ; il a reconnu :

Que les seiches du lac à Sécheron sont très fidèlement reproduites à la Machine hydraulique ;

Que les mêmes seiches sont à la Machine en moyenne 1 ½ fois plus hautes qu'à Sécheron ;

Qu'il y a en moyenne une différence de temps de 5 à 6 minutes entre les deux tracés, les oscillations de l'eau à la Machine étant en retard sur celles de Sécheron.

Ce dernier fait nous donne l'explication des deux premiers, qui pouvaient paraître fort étranges. L'existence des seiches à la Machine hydraulique semblait indiquer que le mouvement de balancement du lac se propagerait jusqu'au fond aval du port de Genève, malgré le rétrécissement très prononcé causé par les jetées sur le banc du Travers (2). L'exagération en hauteur qui les rend une fois et demie plus fortes à la Machine qu'à Sécheron semblait indiquer que le sommet du nœud terminal se trouverait précisément à la Machine. Mais le retard dans l'instant des oscillations de l'eau dans cette station nous montre que nous y avons affaire à un phénomène d'un autre ordre.

Voici comme il doit être interprété. Quand il y a seiche haute dans le lac, l'eau s'écoule en plus grande abondance par le goulet et les golérons du port ; quand il y a seiche basse, le débit est plus faible ; la section utile de ces orifices de l'émissaire varie, en effet, avec la hauteur de l'eau. Ces fluctuations du débit du fleuve à son origine se manifestent par des fluctuations dans la hauteur de l'eau, de là, l'apparition des oscillations de l'eau, de là, l'apparence de seiches à la Machine.

(1) T. I, p. 405.

(2) T. I, p. 293.

Le temps qu'emploie l'eau pour s'écouler depuis l'entrée du port jusqu'à l'Ile de Genève explique le retard constaté sur les tracés de M. Sarasin. Le limnographe placé à un kilomètre plus aval sur le Rhône montrerait des fluctuations analogues, mais avec un retard plus grand, proportionnel à la distance.

J'ai dit que les oscillations de l'eau sous la Machine hydraulique de Genève n'avaient que l'apparence de seiches ; qu'elles étaient le résultat de variations dans le débit de l'émissaire, causées par les variations de hauteur de l'eau du lac, produites elles-mêmes par les seiches du lac. Est-il légitime de m'exprimer ainsi, de parler d'apparence ? J'en ai à peine le droit.

En effet, les seiches ont d'abord été observées, décrites et nommées à Genève, non pas à Sécheron, non pas dans la Genève moderne qui s'avance de plus en plus en remontant sur les rives du lac, mais dans la Genève des siècles derniers qui était limitée à l'origine du Rhône, dans l'arrière-fond du port actuel, en aval du pont des Bergues, tout au plus jusqu'au pont du Mont-Blanc. Les seiches qu'ont vues les vieux Genevois sont donc les seiches du pont de la Machine et non les seiches de Sécheron. Les seiches historiques, les seiches authentiques sont donc les oscillations de la hauteur du fleuve dues à des variations de la hauteur du lac. Nous avons, Vaucher, moi-même et mes collaborateurs, assimilé les seiches du lac avec les seiches de la Machine, nous avons donné le même nom à tous ces mouvements périodiques de la hauteur des eaux ; certainement nous avons commis une erreur, mais il est trop tard pour la réparer. Le nom de seiche est actuellement acquis à l'oscillation de balancement des lacs ; il nous est impossible de le restreindre au sens strict qu'il avait au temps des Fatio de Duillier, des Jallabert, des H.-B. de Saussure. Maintenons-lui donc le sens précis que nous lui avons donné dans tout ce chapitre.

D'après cela, le sommet du ventre terminal des seiches longitudinales, le mur contre lequel se fait la réflexion du mouvement de balancement, n'est pas au barrage de la Machine hydraulique, mais aux jetées du port actuel de Genève ; avant la construction de ce port, il était au banc du Travers. (1)

(1) Nous pourrions faire encore ici une distinction, et dire que, avant la construction du port moderne, le sommet du ventre des seiches longitudinales était au

Quant à l'exagération de hauteur des seiches du lac mesurées dans le Rhône, nous allons en parler dans un instant.

3° *Hauteur relative des mêmes seiches dans deux ventres différents.* Nous avons sur ce sujet les termes de comparaison suivants :

Entre Genève et la Tour-de-Peilz, la proportion est, d'après M. Ed. Sarasin (1) qui a comparé à la fois les uninodales et les binodales : Genève 10, la Tour de Peilz 2 à 2.5.

Entre Genève et Chillon, tracés Plantamour et Forel, 7 demi seiches uninodales du 10 novembre 1878 : Genève 10, Chillon 2.5.

Entre Genève et Morges, tracés Plantamour et Forel : la proportion est Genève 10, Morges 0.8 à 1.0.

Entre Genève et Thonon, tracés Plantamour et Delebecque, binodales du 17 août 1888, à 1h : Genève 10, Thonon 2.2.

Entre Genève et Fleur d'Eau près Rolle; comparaison faite par M. Ph. Plantamour entre ses tracés de Sécheron et ceux de M. Sarasin, à Rolle : Genève 10, Fleur d'Eau 3.0. (2)

La différence énorme de hauteur entre les seiches de Genève et celles de Morges provient de la distance inégale entre ces stations et le sommet des ventres correspondants ; Sécheron est au sommet du ventre de Genève, Morges est près du nœud médian. Nous avons déjà vu le même fait quand nous avons traité des seiches dans diverses stations d'un même ventre.

Mais entre Sécheron et Chillon, stations situées l'une et l'autre à égale distance de l'extrémité respective du lac, la différence de hauteur qui est 4 fois plus grande à Genève qu'à Chillon, tient à d'autres causes. Je puis en indiquer deux. Nous avons vu par notre

banc du Travers quand le barrage de la Machine était ouvert, et au barrage même quand celui-ci était fermé.

(1) (Loc. cit. p. 63, n° 19) p. 728.

(2) M. Philippe Plantamour a eu l'obligeance de me communiquer un tableau de comparaisons qu'il a faites entre la hauteur des seiches à Sécheron, et dans les autres stations du lac, d'après les divers tracés limnographiques. Je reproduis ici les moyennes de ce tableau.

Si les seiches de Sécheron ont une hauteur de 10, elles ont :

A la Machine hydraulique de Genève	15.0
Au Rivage	8.8
A Bellevue	8.6
A Fleur d'Eau, près Rolle	3.0
A Thonon	2.4
A la Tour-de-Peilz	5.3
A Chillon	(?) 10.0

loi VI, p. 72, que la vague d'oscillation fixe est plus haute dans la partie du bassin la moins profonde ; c'est le cas à Genève par rapport à Chillon, le Petit-lac étant moins profond que le Grand-lac. Nous avons vu en second lieu, par notre loi VII, p. 72, que la vague d'oscillation fixe est plus haute dans la partie du bassin qui est la plus étroite. C'est encore le cas à Genève, où le Petit-lac va en se rétrécissant graduellement de 4^{km}, près de Nyon, à quelques cents mètres à Genève, tandis que le Haut-lac, devant Chillon, garde encore sa largeur de 6 à 8^{km} jusque sur le front de la plaine du Rhône. Les deux causes qui influencent la hauteur de la vague s'additionnent ainsi, et la différence entre ces stations est ainsi suffisamment expliquée.

Il est intéressant de voir les seiches de Chillon et celles de Thonon présenter à peu près les mêmes proportions de hauteur, environ $^1/_4$ à $^1/_5$ de celles de Genève. A Thonon et Rolle, le ventre médian des binodales doit avoir à peu près la même hauteur que le ventre terminal oriental de Chillon ; en effet, la largeur du Grand-lac est, dans ces deux régions, assez la même, et au point de vue de la profondeur, le profil en long des deux rampes descendante et ascendante du lac est assez symétrique. En revanche, la grande différence de largeur et de profondeur, entre le lieu du ventre médian et celui du ventre occidental des binodales, doit amener une grande exagération de hauteur des mêmes seiches binodales à Genève par rapport à Thonon et à Rolle. C'est bien conforme aux faits d'observation.

4° *Hauteur maximale des seiches longitudinales.* D'après ce que nous venons d'exposer, les seiches du Léman ont leur maximum de hauteur à Genève. Elles y atteignent des dimensions qui ont attiré depuis longtemps l'attention des observateurs. Voici les plus grandes seiches connues dans cette station ; la hauteur maximale de la dénivellation constatée a été :

16 septembre	1600,	seiches dites	de Fatio de Duillier (1)	1.62^m
3 août	1763,	—	de H.-B. de Saussure (2)	1.47
3 octobre	1841,	—	de Veinié (3)	1.87

D'après ces chiffres, la hauteur maximale des seiches de Genève atteindrait près de 2^m.

Mais nous avons une réserve importante à présenter. Il est

(1) P. 41.
(2) P. 43.
(3) P. 47.

probable que ces observations ont été faites non dans le lac, mais dans le port, dans le Rhône ou à la machine hydraulique. Cela est certain pour les seiches de Veinié ; pour les seiches de Fatio et de Saussure, cela est probable. Or nous avons vu que les seiches étudiées par M. Sarasin à la machine hydraulique étaient notablement plus hautes que celles de Sécheron, qui représentent pour nous les seiches du lac ; et nous en avons donné la raison (1). Nous avons donc une correction à apporter aux chiffres ci-dessus ; nous devons les diminuer pour avoir la hauteur réelle des seiches du lac. Mais comme nous n'avons pas d'observations comparatives faites à cette époque, comme nous ne savons pas, au point de vue des seiches, quelles étaient les conditions d'écoulement du Rhône qui existaient alors, conditions certainement différentes de celles du port de Genève actuel, nous ne pouvons évaluer quelle doit être la valeur de cette correction.

Un fait tout récent prouve la nécessité d'une telle correction. Depuis que M. Ph. Plantamour a établi son limnographe de Sécheron, les plus fortes seiches qu'il a enregistrées sont celles du 20 août 1890 ; elles ont atteint sur les tracés à 10^h une hauteur de 63^{cm}. Or, le même jour, un observateur signalait dans le *Journal de Genève* des seiches de 1.43^m, qu'il avait mesurées dans le Rhône. (2)

Cette divergence énorme dans les observations du 20 août faites à Sécheron, ou dans le Rhône, montre la prudence qu'il faut apporter dans l'appréciation des anciennes observations et ma conclusion sera : De 1877 à 1893, soit en 17 années, le limnographe de Sécheron a enregistré une hauteur maximale des seiches de 63^{cm} ; il est probable que les seiches de Veinié, 1841, qui ont dépassé 1.87^m à la machine, avaient dans le lac une hauteur inférieure à 1^m.

(1) P. 137

(2) « Déjà mardi 19 août, on avait remarqué dans le bras gauche du Rhône plusieurs seiches considérables allant jusqu'à 70^{cm}. Dans la nuit du 19 au 20, le phénomène s'est un peu calmé pour reprendre le 20, au matin, avec une intensité extraordinaire. Il paraît avoir atteint son maximum entre 16 et 17^h. On a en ce moment observé dans le bras gauche du Rhône, en amont du bâtiment des turbines, des variations du niveau de l'eau, qui en un quart d'heure ont atteint 1.43^m. En dehors des jetées, à Sécheron, on a observé, à la même heure, une variation de 53^{cm}. Pendant ces seiches, le régime des eaux du port a été complètement troublé ; par moments les eaux remontaient vers le lac, pour se précipiter ensuite avec un courant extrordinaire vers le Rhône, creusant le fond du port dont la vase troublait les eaux. »

Journal de Genève, 22 août 1890.

Qu'étaient ces seiches extraordinaires des temps anciens ? étaient-elles des uninodales, des binodales ou des dicrotes ? C'est difficile à dire, les renseignements sur la durée des oscillations étant trop peu précis. Tout ce que nous savons, c'est que les grandes seiches de M. Plantamour, du 20 août 1890, étaient manifestement des dicrotes ; l'interférence des deux composantes a certainement exagéré la hauteur de la résultante. Ni les uninodales seules, ni les binodales n'auraient atteint cette amplitude si elles avaient été simples. J'en conclurai que si nous nous basons seulement sur les données certaines, à notre disposition (tracés de M. Plantamour), la hauteur des seiches longitudinales simples du lac ne dépasse pas à Genève 60^{cm} ; que cependant des faits historiques permettent peut-être d'admettre l'existence de seiches encore plus grandes.

5° *Hauteur moyenne des seiches de Genève.* La limnimétrie de Genève joue un grand rôle dans l'histoire du Léman. Elle est cependant soumise à une incertitude due à diverses causes, entre autres aux seiches. Quand nous constatons les dénivellations souvent énormes que produisent ces mouvements de l'eau, on peut comprendre quelle erreur en plus ou en moins peut entacher une observation limnimétrique, faite au moment de la seiche haute ou de la seiche basse. Si l'erreur peut être grave dans certaines circonstances, elle l'est beaucoup moins dans d'autres. Quelle est la valeur moyenne de cette incertitude ?

Pour l'estimer, j'ai utilisé les tracés de Sécheron de l'année 1891, mis très obligeamment à ma disposition par M. Ph. Plantamour. J'ai mesuré chaque jour la hauteur de la plus forte seiche et de la plus faible, et j'en ai tiré la moyenne approximative de hauteur des seiches de la journée. Je mettrai plus loin en usage les valeurs que j'ai obtenues par cette étude, lorsque je me baserai sur les allures des seiches pour en rechercher les causes. Pour le moment, je me borne à leur demander la moyenne générale. La moyenne arithmétique des 365 moyennes journalières des seiches de Genève de l'année 1891 est 45^{mm}.

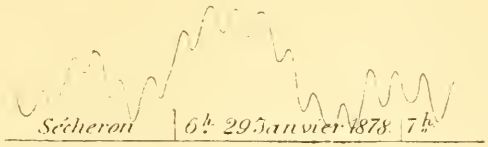
Par conséquent, la dénivellation moyenne des seiches hautes et des seiches basses, au-dessus et au-dessous du niveau immobile de l'eau, a été pendant cette année $\pm$ 22.5^{mm}. Par conséquent l'erreur moyenne, dont les dénivellations des seiches entachent les observations limnimétriques faites à un moment quelconque de l'année est

± 11.2mm. Cette erreur probable s'efface lorsque l'on considère un nombre suffisamment grand d'observations.

N'oublions pas que ce chiffre ne s'applique qu'à la valeur des seiches à Sécheron, en dehors du port de Genève, sur le banc du Travers ; comme nous l'avons vu par la comparaison des seiches de la Machine avec celles de Sécheron, la hauteur des dénivellations est fortement exagérée dans le port. Dans le port de Genève ou à la Machine hydraulique, l'erreur moyenne des observations limnimétriques par le fait des seiches, est plus grande que 11.2mm ; elle doit être de 16 à 17mm.

Seiches anormales.

Je désigne sous cette appellation, en attendant qu'elles puissent être mieux précisées, des oscillations peu fréquentes qui apparaissent parfois, dans des conditions mal déterminées, et dont la signification n'est pas encore reconnue.



(Fig. 75.) Seiches de 7 minutes de Genève. Moitié de hauteur naturelle. 3 cm. par heure.

J'en donnerai quelques exemples, fig. 75 à 77, choisis sur les tracés du limnographe Ph. Plantamour, à Sécheron, Genève. On y verra que ces oscillations peuvent être parfaitement bien marquées, et y atteindre une fort grande hauteur (fig. 76) ; elles ont des allures périodiques incontestables, et montrent parfois une belle régularité. C'est un phénomène bien caractérisé. La durée de ces oscillations est assez variable. J'ai reconnu entre autres un type de 7 minutes environ (fig. 75 et 76), et un type de 20 minutes (fig. 77). Quand on voudra les étudier plus à fond, on y retrouvera certainement plusieurs autres formes.

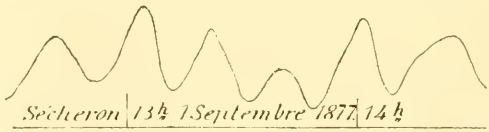
Comment interpréter ces oscillations ? On peut déjà indiquer trois hypothèses.

La première en ferait des seiches transversales, oscillant de Sécheron à la rive opposée, à la côte de Cologny. La largeur du lac étant en ce point de 1800m environ, si l'on y applique la formule des seiches, on voit que pour une profondeur moyenne de 3m, on aurait

des seiches uninodales de 11^{min}, pour une profondeur de 5^{m}, des seiches de 8^{min}. Cela correspondrait assez bien à la durée de 7 minutes des seiches anormales les plus fréquentes. Mais on retrouve des seiches du même type sur les tracés du Rivage, et là les conditions sont très différentes, et les seiches transversales y auraient une toute autre durée. La même hypothèse ne s'appliquerait pas aux seiches anormales de plus longue durée, à celles de 20^{min} par exemple.

(Fig. 76.) Seiches de 7 minutes de Genève. Moitié de hauteur naturelle. 3 cm. par heure.

Une deuxième hypothèse en ferait des seiches obliques, oscillant suivant un diamètre oblique à l'axe du lac, de Sécheron à la Belotte, par exemple, à Collonges ou ailleurs. Il serait évidemment facile de trouver des sections obliques de dimensions convenables pour donner des seiches de durée correspondante à chacun des types connus ou non encore constatés des seiches anormales de Sécheron. Mais nous



(Fig. 77.) Seiches de 20 minutes de Genève. Moitié de hauteur naturelle. 3 cm. par heure.

n'avons aucun droit d'admettre l'existence de seiches oscillant ainsi suivant un diamètre oblique du lac; tout ce que nous savons des seiches nous fait écarter cette supposition.

Une 3e hypothèse en ferait des seiches longitudinales plurinodales, à un grand nombre de nœuds. Si les uninodales ont une durée de 73^{min}, les binodales de 35^{min}, des quadrinodales auraient environ 17^{min}, des octinodales environ 8^{min}, etc. Il est assez probable que

c'est dans cet ordre de faits que la solution du problème doit se chercher. Nous avons constaté la fréquence des binodales : pourquoi des trinodales, des quadrinodales ou des types plus compliqués ne se présenteraient-ils pas dans des circonstances favorables ?

Pour vérifier cette hypothèse, il faudrait retrouver ces mêmes seiches dans d'autres stations. sur l'axe longitudinal du lac, vérifier le synchronisme et la similitude ou l'opposition de mouvement, (cela semble exister pour certains tracés du Rivage, du limnographe Sarasin), constater en même temps des différences de hauteur correspondant à une distance plus ou moins grande entre les stations et le nœud des plurinodales. J'avoue n'avoir pas assez étudié en détail ces seiches anormales pour pouvoir donner des conclusions définitives sur cette question.

Je me borne à signaler ces seiches anormales, et je renonce à les interpréter pour le moment.

2me SYSTÈME, SEICHES TRANSVERSALES

Le plan d'oscillation de ces seiches est étendu transversalement à la longueur du lac, de la côte suisse à la côte savoyarde. Elles représentent un mouvement de balancement dans la largeur du lac.

La largeur maximale, entre le golfe de Morges et Amphion, est de 13.8km ; la largeur moyenne du Grand-lac est de 9km environ ; la profondeur maximale de 309.7m.

Ces seiches n'ont été étudiées jusqu'à présent que dans deux régions du Grand-lac, à Morges et Evian d'une part, à Rolle et Thonon d'autre part. Elles sont différentes dans ces deux parties du lac. Nous en traiterons successivement.

I. SEICHES MORGES-ÉVIAN

Ces seiches ont été vues à Morges dans les anciennes observations de Yersin et ses collègues (p. 49). Je les y ai étudiées dans mes observations sur les courants du goulet du port (p. 53), dans mes observations plémyramétriques (p. 58), enfin plus complètement et mieux, sur les tracés de mon limnographe de Morges. — Quelques observations plémyramétriques m'ont permis de les retrouver sur l'autre rive à Evian.

J'ai constaté ce que j'estime être :

1° Des uninodales.

2° Des binodales.

3° Des dicrotes, interférence d'uninodales et de binodales.

1er type. Seiches uninodales.

Sur les tracés du limnographe de Morges, l'oscillation normale, très fréquente, est une seiche de 10 minutes de durée, qui apparaît souvent à l'état de pureté : nous en avons donné des exemples aux fig. 55, 57, 58, 59, 60 et pl. V, tracé *F*, etc ; d'autres fois elle est irrégulière, fig. 55 et 56 ; ou bien compliquée par des interférences ou des vagues plus courtes dont nous ferons des binodales (fig. 62, 63) ; malgré ces irrégularités et ces complications, le type général de ces seiches y est toujours reconnaissable.

La *durée* de ces seiches est de 10 minutes. Pouvons-nous préciser plus exactement cette valeur ? Voici les mesures que j'ai tirées de quelques séries :

Date.	Début.	Nombre des seiches.	Durée moyenne.
18 avril 1876	17^h55^{min}	18	10.1^{min}
30 décembre 1876	0.36	39	10.3
6 juin 1877	0.35	22	10.3
9 septembre 1877	2.50	19	10.4
14 avril 1879	16.55	24	10.4

Et ainsi de suite. La moyenne est de 10.3^{min} ; en nombre rond 10 minutes ; le rythme est de 6 seiches par heure.

La *hauteur* des seiches de Morges est moins grande que celle des belles seiches de Genève; elle atteint cependant des valeurs fort respectables, et avec la vitesse que nous avons donnée à l'enregistrement de nos limnographes, ces seiches se dessinent en courbes très bien accentuées. La hauteur des seiches varie sur mes tracés de Morges de 0 à 17^{cm}, et plus; sur mes tracés limnographiques qui vont de 1876 à 1883, les plus grandes seiches authentiquement enregistrées sont celles du 21 août 1877, à 20^h, avec une hauteur de 12.4^{cm}, et celles du 24 août 1881, à 10^h30, par un jour très orageux ; cette dernière a atteint 17.7^{cm}.

J'ai cependant à citer une valeur plus grande. Dans la nuit du

19 au 20 août 1881, pendant un orage, l'amplitude extrême des dénivellations du lac s'est élevée à 20.3^{cm}. Malheureusement, le mouvement d'horlogerie du limnographe s'était arrêté, et le crayon revenant sur ses traces donnait bien la hauteur maximale des dénivellations, mais ne dessinait pas les seiches isolées.

Je pourrais encore rapporter ici une observation faite le 10 septembre 1869, à 19^{h}, dans le port de Morges ; des courants d'une violence extrême m'avaient invité à mesurer les dénivellations de l'eau. J'ai noté une amplitude de 26^{cm} dans les variations successives de la hauteur de l'eau. Mais cette observation a été faite tout au début de mes études sur les seiches; mais, et surtout, les conditions d'observation étaient détestables. Je n'avais pas d'échelle limnimétrique abordable, et je mesurais la hauteur de l'eau en la rapportant à une marche d'escalier plongeant dans l'eau ; il faisait nuit et les lectures s'opéraient à la lumière d'allumettes-bougie que je faisais flamber en plein air. Je ne puis donc affirmer aucunement la rigueur de cette observation. (1)

La *fréquence* des seiches de 10 minutes est, comme je l'ai dit, très grande. Je n'exagère pas en disant, que la moitié du temps, ces oscillations sont plus ou moins distinctement représentées sur les tracés limnographiques de Morges.

La *longueur* des séries de ces seiches est beaucoup moins grande que celles de Genève, où elles durent plusieurs jours de suite. Mais si, au lieu de supputer le nombre d'heures que dure la série, on compte le nombre d'oscillations, on voit que dans les deux stations les séries ont à peu près la même importance. Des séries de 30, de 50 seiches se rencontrent sur les tracés de Morges. J'en ai même une série de 76 seiches, du 19 janvier 1877.

Dans cette série, la décroissance de hauteur a été remarquablement lente; les premières seiches mesuraient 15^{mm} de hauteur, les dernières 5^{mm} ; la décroissance n'aurait été que de 0.15^{mm} par oscillation.

(1) Voici les notes personnelles de M. Ch. Dufour, à Morges: « 10 septembre 1869: forte baisse du baromètre. Temps calme et couvert, avec menace de pluie jusque vers 22 $^{1}/_{2}$^{h}. Alors il fait un coup de vent du S.-W. et il pleut un peu. Fortes seiches le soir. » — A Lausanne on note un vent assez fort du S.-W. dans la soirée et une chute d'eau de 21^{mm} dans la nuit du 10 au 11 septembre. Ce sont bien là les conditions de production de fortes seiches, mais non de seiches extraordinaires.

La coexistence des seiches de 10^{min} avec les longues seiches uninodales de 73^{min} est parfaitement authentique ; j'en ai donné des exemples dans les fig. 55, p. 97 et fig. 73 p. 126 ; j'en pourrais citer vingt cas aussi probants. Si donc les oscillations de 10 minutes sont bien des seiches transversales, il y a dans le lac coexistence, interférence des deux mouvements de balancement, le longitudinal et le transversal, celui qui balance suivant l'axe Villeneuve-Genève, et celui qui balance suivant l'axe Morges-Evian. J'avais constaté la possibilité d'une telle coexistence dans mes bassins d'expérimentation ; il est intéressant de la retrouver en nature, dans le lac.

Mais, avons-nous bien affaire à des seiches transversales ?

Ne serait-ce pas plutôt une seiche longitudinale plurinodale, une octinodale, comme le suppose un de mes amis, qui aurait un de ses ventres à Morges ? Cette hypothèse ne me semble pas admissible. En effet, une seiche de type quelconque, qu'elle soit uninodale ou plurinodale, a toujours un ventre aux extrémités du bassin ; toutes les seiches longitudinales de tous les types possibles doivent donc se dessiner à Genève et à Chillon. Et comme l'effet d'amplification de la hauteur des dénivellations dû au rétrécissement et au peu de profondeur du lac à Genève est valable pour tous les types de seiches longitudinales, celles-ci y ont toutes une hauteur exagérée comparativement à celles des autres stations du lac. Par conséquent si les seiches de 10^{min} de Morges étaient des longitudinales plurinodales, elles devraient apparaître sur les tracés de Genève et de Chillon chaque fois que nous les voyons à Morges, et leur hauteur devrait être à Genève au moins 5 fois plus forte qu'à Morges (en analogie aux proportions relatives des binodales à Genève et Thonon). Or ce n'est certainement pas le cas. J'écarte donc sans hésiter l'hypothèse qui ferait des seiches normales de Morges des plurinodales longitudinales.

Pour démontrer la nature transversale uninodale de ces seiches de Morges, il aurait fallu faire fonctionner un limnographe à Evian simultanément avec celui de Morges, et prouver, par une comparaison soignée d'observations bien réglées, le synchronisme et l'opposition des mouvements. Nous ne possédons pas ces observations.

Les seules observations utiles que j'aie dans cet ordre de faits ne sont malheureusement pas suffisamment démonstratives. Le 30 septembre 1874, les 3 février et 9 mars 1875, pendant que notre ami, M. le professeur G. Rey, observait les seiches de Morges avec un

plémyramètre, je me rendais en Savoie et j'y faisais des observations plémyramétriques près d'Evian. J'en ai donné les résultats dans les figures 85 à 88 de la planche XI de ma 2e étude sur les seiches (1). Les résultats ne sont pas très brillants. On voit bien parfois à Evian des seiches de courte période, de 10 minutes environ, coexister avec celles de Morges ; à une ou deux reprises, le 3 février, de 15h10 à 15h30, le 30 septembre, de 11h40 à 12h40, le 9 mars, à 13h55, il y a opposition évidente des sommets des seiches de 10 minutes. Mais cette opposition n'a pas toujours lieu. Ces observations ne suffisent pas pour donner une démonstration définitive.

Serons-nous plus heureux en appliquant à ce problème la formule de M. P. du Boys ? — Il semble que rien n'est plus facile, étant connue la carte hydrographique d'un lac, que de calculer la durée du balancement de l'eau. Mais ce qui serait très simple pour un bassin régulier, devient beaucoup plus compliqué dans le bassin accidenté d'un lac. Nous avons déjà vu cette difficulté à propos des seiches longitudinales ; nous la retrouvons ici, et plus grande encore, pour nos seiches transversales. En effet, quelle est, dans le Léman qui nous occupe, la section que nous devons considérer ? quel est le profil vertical qui détermine par sa longueur et sa profondeur la durée de l'oscillation transversale du lac ? Il est évident que c'est la masse entière du lac, disons provisoirement du Grand-lac, qui oscille dans un mouvement de balancement d'une rive à l'autre. Mais le Grand-lac n'a pas partout la même largeur, ni la même profondeur ; son profil transverse est très différent d'un point à l'autre. J'ai fait trois essais de calcul par le procédé Paul du Boys :

1° Sur le profil transverse de la plus grande largeur du lac, du fond du golfe de Morges à la côte d'Amphion. Ce profil, de 13.8km de longueur, passe au début de la rampe ascendante de plafond du lac (2) ; il atteint cependant la plaine de grande profondeur de 300m à son angle occidental. Le calcul me donne pour des seiches uninodales, suivant ce profil, une durée de 16 minutes environ.

2° Sur le profil Ouchy-Petite Rive, à travers le milieu de la plaine centrale des grandes profondeurs du lac. Ce profil a 11.2km de longueur ; il donne, pour la durée des oscillations uninodales, une durée de 11.4min.

(1) [Loc. cit. p. 62, n° 2.] Pl. XIV.
(2) T. I, p. 52.

3° Si je prends le profil Lutry-Tour ronde, de 10.4^{km} de longueur, qui passe par l'extrémité orientale de la plaine centrale du lac, là où les talus sont le plus inclinés, là où la section transversale est la plus profonde par rapport à la largeur du lac, j'arrive, par le calcul, à une durée de 10.9^{min} pour les oscillations uninodales.

C'est ce dernier chiffre qui se rapproche le plus de la valeur des seiches de Morges, et il semblerait que ce soit dans cette région du lac, celle où est la masse d'eau la plus importante, que se détermine le rythme du mouvement de balancement. (1)

En somme, le calcul de la durée des seiches transversales en fonction de la longueur et de la profondeur des profils du Léman, ne donne pas des résultats trop différents de la durée trouvée par l'expérience pour les seiches de Morges (le résultat des calculs que j'ai tentés est toujours trop fort) ; il n'y a pas là d'objection sérieuse à l'hypothèse de la nature des seiches transversales que nous étudions ; j'y verrais plutôt une confirmation de l'hypothèse. Mais je dois reconnaître que je suis loin d'être arrivé à utiliser, avec certitude et précision, l'intéressant procédé dont M. du Boys nous a dotés.

Quoi qu'il en soit, je n'ai pas une objection sérieuse contre l'hypothèse qui fait des seiches de 10 minutes, de Morges, des transversales uninodales du lac. Tous les arguments parlent en sa faveur. Jusqu'à réfutation, je continuerai donc à l'adopter comme plausible.

2e type. Seiches binodales.

Sur les tracés de Morges, presqu'aussi fréquemment que les seiches de 10 minutes, on voit une seiche plus courte, de 5 minutes de durée, que je tiens pour la transversale binodale du Grand-lac. Elle apparaît en séries bien marquées, dont j'ai donné un exemple dans la fig. 61, p. 101. Ces seiches ont été vues par Yersin dans son observation du 3 décembre 1854 (p.49) ; elles sont assez fréquentes pour avoir abaissé considérablement la durée moyenne des seiches de Morges, étudiées par moi au goulet du port (p. 54).

Ces seiches de 5 minutes, sont souvent irrégulières, et leurs séries

(1) Il y aurait encore une autre possibilité : le rythme de l'oscillation serait déterminé par la moyenne des différentes sections transversales du lac. Mais j'avoue ne pas savoir comment tenter le calcul qui vérifierait cette supposition.

ne sont en général que peu longues ; aussi ai-je eu plus de peine que pour les uninodales a en déterminer la durée exacte. Cependant, j'ai rencontré une série de 86 oscillations, suffisamment régulières, ayant débuté le 5 octobre 1876, à 17^h55, et qui m'a donné une durée moyenne de la seiche de 5.3^{min}. Cette seiche est donc légèrement plus longue que la moitié de l'uninodale, dont la durée est de 10.3^{min}.

3e type. Seiches dicrotes.

Les seiches dicrotes que nous avons vues si belles et si fréquentes chez les longitudinales du Léman, existent aussi chez les transversales. J'en ai une foule d'exemples sur les tracés de Morges, (fig. 62 et 63, p. 101 et 102). Mais elles ne sont jamais en séries longues et régulières, comme les belles seiches que nous avons étudiées à Genève. Je me borne donc à constater leur existence, sans vouloir essayer d'en suivre les particularités plus en détail.

SEICHES THONON-ROLLE

Partant de notre hypothèse que les seiches transversales oscillent d'un côté à l'autre du lac, nous avions supposé que le mouvement de balancement s'effectuerait en masse dans tout le lac, tout au moins dans toute l'étendue du Grand-lac. Nous nous attendions donc à retrouver nos seiches de 10 minutes, de Morges, non seulement à Evian où nous les avons constatées, mais encore à Thonon et Rolle, dans la partie occidentale du Grand-lac.

Grand a été mon étonnement en n'en voyant pas traces sur les courbes des limnographes. Dans toute cette région du Grand-lac qui est à l'ouest du détroit de St-Prex-Pointe de la Drance, nous trouvons des seiches de 7 minutes, très jolies, bien dessinées, souvent en belles séries (Pl. V, fig. *G*, p. 105) ; elles ont dans cette partie du lac les mêmes caractères, la même fréquence, le même développement en séries que les seiches de 10 minutes de Morges. Je les constate parfaitement dessinées sur les tracés de Thonon du limnographe des Ponts et Chaussées français, sur les tracés de Fleur-d'Eau, près Rolle, du limnographe Sarasin ; les tracés de mon limnographe portatif à Séchex, près Anthy, et à Rolle, ne m'en ont donné que des

indices. Je crois pouvoir les désigner comme étant des seiches de courte périodicité, normales dans le bassin occidental du Grand-lac, comme celles de 10^{min} sont normales à Morges.

Quelle est la signification de ces seiches de 7 minutes ?

J'avais d'abord pensé à en faire des seiches transversales, oscillant dans une section plus étroite du lac, et par suite ayant une durée plus faible que les seiches de Morges. Mais dans la région Rolle-Thonon, la largeur du lac est presque aussi grande que dans la partie médiane du Grand-lac et, d'autre part, l'eau y est beaucoup moins profonde ; par conséquent, la durée de l'oscillation de balancement devrait y être sensiblement plus longue. Si les seiches de 10^{min} de Morges sont des transversales uninodales de la région médiane du Grand-lac, les seiches de 7^{min} de Rolle ne peuvent être des seiches de même type de la partie moins profonde du même Grand-lac.

Serait-ce peut-être des transversales binodales ? Mais alors, pourquoi ne trouvons-nous pas des uninodales de 14 minutes environ de durée ?

Serait-ce peut-être des longitudinales plurinodales ? Mais alors, nous devrions les retrouver à Genève (ventre terminal de toutes les longitudinales), et avec une hauteur beaucoup plus forte, chaque fois qu'elles apparaissent à Rolle. J'ai parfois vu sur les tracés de Sécheron des seiches de 7^{min}, quelquefois assez grandes (10^{cm} de hauteur, le 22 novembre 1879, à 23^{h}) ; mais elles y sont assez rares pour que je les aie tenues pour accidentelles, tandis qu'à Rolle et Thonon elles sont beaucoup plus fréquentes.

Je ne sais vraiment que faire de ces seiches de 7 minutes de Thonon et de Rolle, et je dois laisser à mes amis, MM. Sarasin et Delebecque, qui ont à leur disposition les beaux tracés de leurs limnographes dans ces stations, le soin de résoudre le problème qui nous est posé par ces oscillations.

J'ajouterai que, accidentellement, des seiches de 7 minutes apparaissent sur les tracés de Morges (fig. 66, p. 104).

ANNEXE. *Etudes modernes sur les seiches des lacs autres que le Léman.*

Quoique ce livre ne soit et ne doive être qu'une monographie, c'est-à-dire une collection des faits observés dans le territoire limité au lac

Léman qui en est le sujet, qu'il me soit permis, dans ce chapitre, d'étendre un peu le plan de mon ouvrage. Les seiches sont étudiées et comprises depuis si peu de temps, elles sont d'une observation si difficile, leur théorie est encore si incomplète, que pour l'essai de généralisation que je tente actuellement, je ne puis laisser de côté aucun des matériaux à ma disposition.

Je résumerai donc les faits, — ils sont, hélas ! bien rares — qui nous sont connus dans les bassins d'eau autres que le Léman, et qui sont semblables ou analogues à nos seiches.

1° Observations plémyramétriques dans quelques lacs suisses.

J'ai d'abord à citer quelques observations faites par moi ou mes amis dans un certain nombre de lacs, où nous avons établi l'instrument décrit à la page 88, sous le nom de plémyramètre. Elles constateront l'existence constante des seiches et la facilité avec laquelle on peut les observer par cette méthode. Cependant l'étude plus complète basée sur les documents limnographiques que j'ai résumés ci-dessus pour les stations principales du Léman, montre qu'il serait fort imprudent de déduire la durée des seiches normales d'une station, en se fondant seulement sur quelques observations plémyramétriques, faites à un jour quelconque; la chance peut avoir favorisé l'observateur et lui avoir du premier coup montré les seiches typiques de la localité, disons les seiches uninodales régulières : la chance peut lui avoir été défavorable, et lui avoir fait voir des seiches irrégulières, des seiches compliquées, des seiches binodales ou plurinodales, des seiches anormales.

Ces réserves exprimées, voici le résumé de quelques observations faites sur divers lacs à l'aide du plémyramètre. (1)

I. **Lac de Constance :** longueur 64.8^{km}, largeur maximale 14.5^{km}, profondeur maximale 252^{m}.

Seiches longitudinales.

Bregenz	14 septembre 1874	durée 59.8^{min}	(5). (2)
Rorschach	27 août 1874	— 47.8 —	(3).

(1) Voir les détails de la plupart de ces observations : Deuxième étude sur les seiches [loc. cit. p. 62, n° 2.] p. 547-567.

(2) Je donne la durée en minutes de la seiche entière. Le nombre entre parenthèses indique le nombre de demi-seiches que j'ai observées.

Seiches transversales.

Kreuzlingen	27	août	1875	durée 9.3^{min}	(18).
Friedrichshafen	—	—	—	— 4.7 —	(9).
Romanshorn	—	—	—	— 10.7 —	(6).

II. **Lac de Neuchâtel :** longueur 38.2^{km}, prof. max. 153^{m}.

Yverdon	29 décembre 1873, seiches de 45^{min} brodées de 10^{min}		
	25 septembre 1874	durée 25.5^{min}	(10).
	4 mars 1875	— 47.1 —	(5).
Préfargier,	14 octobre 1874	— 47.4 —	(9).

III. **Lac de Thoune :** longueur 17.5^{km}, prof. max. 217^{m}.

Schadau, 22 septembre 1874, durée 18.6^{min} (9, irrégulières).

IV. **Lac de Walenstadt :** longueur 15.5^{km}, prof. max. 151^{m}.

Weesen, 18 septembre 1874, durée 14.5^{min} (10).
16 août 1890 — (15, irrégulières).

V. **Lac de Brienz :** longueur 13.7^{km}, prof. max. 261^{m}.

Bönigen, 23 septembre 1874, durée 9.8^{min} (10).

VI. **Lac de Morat :** longueur 9.2^{km}, prof. max. 49^{m}.

Loewenberg, 24 septembre 1874, durée 9.5^{min} (10, irrégulières).

VII. **Lac de Joux :** longueur 9.0^{km}, prof. max. 33^{m}.

Le Pont, 3 août 1874, durée 12.4^{min} (8).

VIII. **Lac de Silz :** longueur 5^{km}, prof. max. 73^{m}.

19 septembre 1875, durée 4.7^{min} (13). (1)
24 — — — 4.7 — (8).

IX. **Lac de Bret :** longueur 1.1^{km}, prof. max. 14^{m}.

13 novembre 1874, durée 3.0^{min} (14, très faibles).
1 avril 1875 — 1.0 — (36, très faibles).

La valeur de ces observations est trop peu sûre pour que j'essaie d'en tirer d'autres conclusions que :

a Les seiches existent dans tous les lacs où nous avons établi notre plémyramètre.

b Leur durée semble répondre aux conditions des lacs et être dans les rapports que nous avons exposés à propos des seiches du Léman.

Je n'ai vu dans ces observations aucune contradiction avec la théorie que nous avons développée.

(1) Ziegler et Caviezel [loc. cit. p. 63, n° 6].

2° Etude limnographique des seiches du lac de Constance (Bodan).

En même temps que les délégués des cinq états riverains faisaient établir la carte hydrographique du Bodan, une sous-commission présidée par M. le comte Eb. de Zeppelin-Ebersberg, à Constance, était chargée de faire des recherches de limnologie sur le lac. Nous y avons entre autres commencé l'étude des seiches. M. Ed. Sarasin a eu la libéralité de nous prêter son limnographe transportable et nous l'avons installé successivement, M. le comte de Zeppelin et moi-même, dans les stations de Bodman (près Ludwigshafen à l'extrémité occidentale du lac d'Ueberlingen), à Constance et à Kirchberg (près Immenstadt) (1). Les observations ont duré 9 mois, de mai 1890 à janvier 1891.

Nous avons reconnu l'existence de seiches de types divers que nous avons déterminées comme suit :

a Seiches longitudinales uninodales, admirablement dessinées sur les tracés de Bodman. Durée 55.8^{min}.

b Seiches longitudinales binodales, visibles sur les tracés de Bodman et de Constance, mais surtout parfaitement claires et bien marquées sur ceux de Kirchberg, cette station étant située sur le ventre médian de ce type de seiches. La durée des binodales est de 28.1^{min}. ; elles sont par conséquent plus longues que la moitié des uninodales. C'est le contraire de ce que nous avons vu dans le Léman où les binodales sont plus courtes que la moitié des uninodales. Nous reviendrons sur cette question dans un instant.

c Seiches longitudinales dicrotes, interférence des uninodales et des binodales. Elles existent, et nous en avons trouvé des exemples incontestables sur les tracés de Bodman, mais elles sont loin d'y montrer le beau développement qu'elles ont à Genève.

d Les seiches normales de Constance ont une durée de 15 minutes. Nous ne savons quelle en est la signification.

e Sur les tracés de Kirchberg, outre les longitudinales uninodales de 55.8^{min}, très faiblement dessinées, et les binodales de 28.1^{min}, très bien marquées, nous trouvons quelques exemples de seiches de 39.1^{min}, peu fortes, mais incontestables. Ces seiches, de durée plus courte que les uninodales, plus longue que les binodales, que sont-elles ? Je n'en

(1) Voir mon rapport détaillé dans les Bulletins du *Bodenseeverein*.

sais rien. J'ai épuisé toutes les suppositions, et me suis heurté dans tous les sens à des objections irréductibles ; j'avoue mon embarras, et je ne veux pas chercher à l'excuser. J'en attends la solution d'observations plus nombreuses faites dans un plus grand nombre de stations, que nos amis, les naturalistes du Bodan, ne tarderont pas, nous l'espérons bien, à organiser.

f Seiches de 4 minutes dans la station de Kirchberg, probablement des transversales uninodales.

Les séries des seiches longitudinales sont fort belles et se prolongent fort longtemps, souvent à un état de pureté absolue, aussi bien les longitudinales à Bodman que les binodales à Kirchberg.

Pour l'application de la formule P. du Boys, nous avons rencontré dans les seiches du lac de Constance la même réussite générale que nous avons reconnue dans le lac de Genève, mais en même temps les mêmes difficultés de mise en pratique nous ont empêché de l'utiliser autant que nous l'aurions voulu.

En somme, il y a la plus grande analogie entre les seiches du Bodan et celles du Léman. Sauf quelques différences de détail et quelques questions nouvelles qui nous y sont posées, nous avons retrouvé dans le grand lac du nord-est de la Suisse la confirmation la plus entière de notre théorie des seiches fondée primitivement sur l'étude seule des seiches du lac Léman.

3° Etude limnographique des seiches du lac de Zurich.

Ce beau lac, fort long, fort étroit, peu profond, presque rectiligne, semblait offrir les meilleures conditions de développement des seiches. M. Ed. Sarasin est allé établir son limnographe dans la villa Welti à l'Enge, en juin 1886, et l'y a fait fonctionner pendant toute une année. Mais les résultats ont été fort décevants [1] ; au lieu de belles seiches, de belles séries de seiches, comme l'un et l'autre nous nous y attendions, M. Sarasin n'a obtenu que des oscillations mal marquées, peu accentuées, formant des séries de quelques seiches à peine, s'éteignant et disparaissant très vite. Si l'étude des seiches avait été entreprise à Zurich sans que l'on sût rien des seiches de Genève, l'on n'aurait jamais deviné la beauté, la grandeur, le régularité du phé-

[1] *Ed. Sarasin* [loc. cit. p. 64, n° 27].

nomène. M. Sarasin explique cette différence dans le développement des seiches, à Zurich d'une part, dans le Léman et le Bodan d'autre part ; il pense que cette irrégularité et ce peu de persistance doivent tenir, en bonne partie du moins, à l'action de la barre de Rapperswyl qui déterminerait un nœud factice d'oscillation en un point du lac qui ne correspond pas à un nœud de quelqu'une des oscillations simples du lac, uninodale, binodale ou autre ; de telle sorte qu'elle trouble ses mouvements pendulaires et le fait vibrer à faux. Cette explication me paraît parfaitement plausible, et je trouve dans cette faiblesse et cette irrégularité des seiches de Zurich une confirmation de notre théorie générale des seiches.

Quoi qu'il en soit, malgré cette difficulté d'observation, M. Sarasin est arrivé à déterminer la durée des seiches longitudinales uninodales qui est de 45.6^{min}, et celle des seiches binodales, 23.8^{min}, qui en est presque exactement la moitié, mais cependant un peu plus longue que cette moitié (1). Nous aurions donc un fait analogue à celui du lac de Constance dans le rapport de longueur entre l'uninodale et la binodale.

4° Etude limnographique des seiches du lac de Neuchâtel.

Dans l'espoir d'avancer la solution du problème difficile qui nous est posé par le rapport variable d'un lac à l'autre dans la durée des uninodales et des binodales, M. Ed. Sarasin a cherché un lac simple dans sa forme qui pût donner des résultats clairs et nets. Il a choisi le lac de Neuchâtel, lac de grandes dimensions, 38.2^{km} de long, lac de profondeur maximale de 153^{m}, profondeur qui n'a rien d'exagéré, lac de forme rectangulaire, parfaitement rectiligne. Il semblait que les conditions y seraient parfaites.

M. Sarasin a établi son limnographe en septembre 1891 à Yverdon, en février 1892 à Neuchâtel, et l'instrument a fonctionné en tout, dans ces deux stations, pendant plus de 6 mois (2). Mais là encore une grande déception a répondu à nos espérances. Les seiches du lac de Neuchâtel sont aussi irrégulières, et aussi mal développées en séries, que celles du lac de Zurich ; si quelques oscillations atteignant une hauteur de 10 à 12^{cm} apparaissent assez souvent, jamais elles ne se

(1) Archiv. Genève XXVI, 82, 1891.

(2) *Ed. Sarasin.* Archives, Genève, XXVIII, 356, 1892.

suivent en séries prolongées ; 5 ou 10 oscillations tout au plus, voilà les longues séries des seiches de ce lac. Ce résultat négatif nous a surpris d'abord ; nous y avons cependant trouvé une brillante confirmation de notre théorie des seiches.

En effet, si le lac de Neuchâtel est bien régulier dans sa forme, et si sur la carte géographique il dessine un rectangle allongé presque parfait, sur la carte hydrographique il montre un relief très particulièrement compliqué. Une colline sous-lacustre, la Motte, parallèle à la longueur du lac, s'étendant depuis Vaumarcus jusqu'à Auvernier, élève son sommet jusqu'à 8^m seulement au-dessous des eaux moyennes ; elle sépare le lac en deux chenaux de profondeur différente : l'un, le long de la côte neuchâteloise, descend jusqu'à 153^m de profondeur, l'autre, le long de la côte fribourgeoise, n'a, dans sa partie moyenne, qu'une profondeur maximale de 94^m. Cela étant, le mouvement d'oscillation longitudinale du lac doit passer simultanément par ces deux canaux, mais comme leur profondeur n'est pas la même, la période des seiches doit y être différente. Une même vague partie d'Yverdon arrivera plus vite à Préfargier en passant par le canal neuchâtelois, le plus profond, qu'en suivant le canal fribourgeois, moins profond. Il ne pourra donc pas s'établir de mouvement de balancement régulier, et il n'y aura production de séries de seiches que dans le cas où l'oscillation de l'eau ne se fera que dans un seul des deux chenaux. Comme pour le lac de Zurich, mais par un mécanisme différent, nous avons donc dans le lac de Neuchâtel un instrument qui sonne faux, des oscillations de durée légèrement différente se superposant ; de là l'absence toute naturelle de belles séries de seiches. M. Sarasin a adopté cette explication que je lui avais proposée, et nous y voyons l'un et l'autre une justification intéressante de la théorie.

M. Sarasin a cependant essayé de déterminer la période des seiches de ce lac. Il est arrivé à un double résultat, à savoir, d'une part, des seiches de 50 et de 25 minutes, qui seraient des longitudinales uninodales et binodales, d'une autre part, des seiches de 39.5^{min}. — Est-ce que ce ne serait peut-être pas, les premières, des seiches oscillant par le chenal fribourgeois, le canal le moins profond, où les seiches sont les plus ralenties, les dernières, les seiches du canal neuchâtelois plus profond où les seiches seraient les plus rapides ? Je soumets cette question à mon ami Sarasin.

Les seiches du lac de Neuchâtel sont trop peu distinctes pour que M. Sarasin ait pu les utiliser pour juger de la durée relative des uninodales et des binodales.

5° Etude limnographique des seiches du lac George, Nouvelle Galle du Sud.

J'ai signalé, pages 61 et 80, les travaux de M. H.-C. Russell, directeur de l'Observatoire de Sidney, sur le lac George, vaste lac dans les montagnes de Gourock. J'ai donné la position géographique et les dimensions de ce lac (p. 80). Le rapport de M. Russell sur ses observations dans ce lac étant difficilement abordable [1], je crois utile d'en extraire encore quelques passages intéressants. Je les traduis librement en transformant en valeurs métriques les mesures anglaises de l'original.

« L'appareil limnographique a été mis en place devant Douglas-House, vers l'extrémité méridionale du lac, le 18 février 1885, et le crayon commença à 19^h à enregistrer les dénivellations du lac. A ce moment, les eaux étaient au calme plat, et personne n'aurait soupçonné que ce miroir subissait les dénivellations que l'instrument allait nous montrer. Le tracé du limnographe nous présenta d'abord une crue de 5^{cm}, suivie d'une décrue qui ramena l'eau au niveau primitif, cette dénivellation ayant mis un peu plus de 2 heures à s'accomplir ; .....le même phénomène se reproduisit, et au bout de 24 heures il était déjà évident pour nous que le lac présentait des oscillations régulières avec un rythme de 2 heures et quelques minutes.

« .....Déjà dans l'après-midi du second jour, nous reçûmes quelque lumière sur les causes de ces pulsations ; un violent orage passa sur l'extrémité sud du lac ; une pluie abondante aurait dû occasionner une crue générale du lac, mais en même temps un violent coup de vent du sud frappant l'eau, le limnographe montra une rapide dépression du niveau liquide ; le lac baissa de 8^{cm}. En 10 minutes, l'ouragan avait passé et l'eau ne tarda pas à reprendre son niveau... Mais elle ne s'arrêta pas dans sa crue au point où le niveau primitif était atteint ; la force acquise (momentum) l'entraîna au-dessus de cette hauteur, et éleva notablement l'eau au-dessus du niveau moyen. Puis l'eau s'af-

[1] *Russell* [Loc. cit. p. 64. N° 24].

faissa de nouveau, et les mêmes oscillations se répétèrent, dans un rythme de 2 heures environ, avec des hauteurs de dénivellation décroissant progressivement, jusqu'à ce qu'au bout de 8 heures l'eau fut devenue presque immobile. Quand soudain, à 23^h30, l'eau commença à s'élever plus vite que jusqu'alors et en 40 minutes atteignit une hauteur de 10^{cm}; puis elle redescendit et, en 101^{min}, elle s'abaissa de 15^{cm}. A Douglas-House le temps était calme, la nuit claire, sans signes d'orage; mais il est probable qu'à l'extrémité nord du lac un orage avait passé, qui avait mis l'eau en mouvement; l'oscillation, toujours avec un rythme de 2 heures, se prolongea pendant 14 heures. J'ai eu moi-même la bonne fortune d'être présent sur les lieux, et de constater à la fois l'état du lac et celui de l'atmosphère, et j'ai noté que sans doute la première série de pulsations était due à une soudaine décrue locale du lac, que la seconde série, plus énergique que la première, était due à une crue locale de l'eau.

« ... Ordinairement une pareille suite d'oscillations dure de 10 à 12 heures, la hauteur des dénivellations diminuant graduellement comme si la friction de l'eau épuisait le mouvement; mais dans quelques cas nous avons vu ces séries se continuer pendant plusieurs jours.

« .....Dans tous les exemples jusqu'à présent mentionnés, il semble que l'impulsion ait été donnée par un orage éclatant sur le lac. Mais il est d'autres cas dans lesquels l'action génératrice paraît avoir eu un caractère tout différent ; il semblerait qu'alors la première impulsion aurait été relativement faible, mais que, répétant son effet, elle aurait amené successivement aux mêmes résultats qu'une impulsion unique très puissante ; exactement comme une masse pesante suspendue à une corde peut être mise en balancement pendulaire de grande amplitude par une succession de petits coups convenablement répétés à chaque oscillation. On dirait que la force d'impulsion, quelle qu'en soit la nature, commence par une très petite action qui augmente progressivement son effet. Le meilleur exemple est celui du 5 avril; le lac était parfaitement calme. Il y eut successivement les dénivellations suivantes :

1re	oscillation,	crue	2.5cm.,	décrue	5.0cm.
2e	—	—	5.0 —	—	8.9 —
3e	—	—	9.5 —	—	etc.

la série entière dura plus de 20 heures.

Pour mesurer la période de ces oscillations, j'en ai choisi 54 parmi les mieux définies et j'ai obtenu :

33	avec une période de	$2^h 11^{min}$	soit	131^{min}.
5	—	2 5	—	125
6	—	2 17	—	137
10	—	1 12	—	72

Il y a donc deux types de pulsations, l'un de 131^{min} de durée moyenne, l'autre de 72^{min}. Il est remarquable que dans le lac George, comme dans le lac de Genève, la seiche à courte période n'a pas exactement la moitié de la durée de la seiche à longue période... »

Retenons de cette analyse des observations de M. Russell les faits les plus importants :

a La très longue durée des seiches du lac George. Malgré les dimensions peu considérables du bassin — le lac n'a que 29^{km} de long, soit à peu près la moitié de la longueur du Léman, — ses seiches ont une durée de 131 minutes, soit près du double des longitudinales uninodales de notre lac. Cette différence s'explique, comme nous l'avons dit, p. 80, par la très faible profondeur du lac qui n'a que 5 à 6^m d'eau et rentre dans la catégorie des étangs. Ces seiches de $2^h 11^{min}$ sont les plus longues qui aient jusqu'à présent été mesurées.

b La brièveté des séries de seiches du lac George. D'après les faits cités par M. Russell, les séries de seiches durent en général 10 à 12 heures, ce qui représente 5 à 6 seiches seulement. Quelquefois la série est plus longue et dure plus d'un jour ; mais avec le rythme très lent des oscillations, le nombre des seiches de la série est toujours très restreint. Cela est bien évident dans les planches où M. Russell a reproduit quelques tracés limnographiques du lac George [1]. Les séries de seiches y sont extraordinairement courtes, la hauteur des dénivellations y décroît très vite ; elles disparaissent au bout de quelques oscillations. On y voit entre autres une belle série (ce doit être une des plus longues) commencée le 28 juillet 1885, par des dénivellations de 12^{cm} de hauteur qui vont rapidement en décroissant, sont réduites à zéro au bout de 26 seiches. Cela donne un taux de décroissance de 5^{mm} environ par seiche.

Nous avons vu que, pour les seiches longitudinales du Léman, qui

[1] *H.-C. Russell.* Local variations and vibrations of the earth surface, R. Soc. of N. S. W. 1 july 1885, pl. 1 et 2.

nous donnent des séries de 100, de 150 et même de 200 seiches, ce taux de décroissance est beaucoup moins rapide, et ne s'élève qu'à 1.6^{mm} par oscillation (p. 112) Cette différence d'allures entre les deux lacs s'explique, je crois, facilement par la profondeur minime du lac George ; les frottements de l'eau doivent y être infiniment plus actifs que dans le Léman, beaucoup plus profond, et le mouvement doit y être beaucoup plus vite annulé.

Nous pourrions de cette comparaison tirer une loi : Plus la profondeur relative d'un lac est grande, plus le taux de décroissance des seiches doit y être faible, plus les séries de seiches y seront longues.

c Les deux types d'impulsion que M. Russell décrit, impulsion maximale dès le début de la série, impulsion d'action croissante dans les seiches successives, nous occuperont quand nous traiterons des causes des seiches.

d La durée relative des uninodales et des binodales du lac George est : uninodales 131^{min}.

binodales 72^{min}.

Les secondes sont donc plus longues que la moitié des uninodales, moitié qui serait 66^{min}.

Résumons à cette occasion les faits d'expérience au sujet de ce rapport entre la durée des deux types principaux des seiches.

Nous avons vu, page 69, que *a priori* la durée des binodales (t') semble devoir être exactement la moitié de celle des uninodales (t). Le rapport $\frac{t}{t'}$ doit-être, appelons-le ρ :

$$\frac{t}{t'} = \rho = 2$$

M. Paul du Boys est arrivé à la même conclusion que moi (p. 84).

Nous avons vu que la formule de Merian interprétée par M. Ch. Soret (p. 84), nous donne :

Dans un bassin de profondeur infinie $\rho = \sqrt{2}$

Dans un bassin de profondeur nulle $\rho = 2$.

Nous avons vu d'autre part (p. 85) que l'expérience, dans des auges de petites dimensions, m'avait donné pour des vagues de balancement :

Pour une faible profondeur d'eau $\rho > 2$.

Pour une profondeur moyenne $\rho = 2$.

Pour une profondeur forte $\rho < 2$.

Enfin les observations sur les seiches des lacs nous ont donné les résultats suivants :

Longitudinales du Léman (p. 129) $\rho = \frac{73.5}{35.5} = 2.07$.

Longitudinales du Bodan (p. 155) $\rho = \frac{55.8}{28.1} = 1.98$.

Longitudinales du lac de Zurich (p. 157) $\rho = \frac{45.6}{23.8} < 2$.

Longitudinales du lac de Neuchâtel ρ ... ?

Longitudinales du lac George (p. 162) $\rho = \frac{131}{72} = 1.82$.

Ainsi donc, pour le Léman, le rapport $\rho = \frac{t}{t'}$ est plus grand que 2, pour les lacs de Constance et de Zurich, et le lac George, il est plus petit que 2.

Nous avons dit (p. 131), l'explication que M. P. du Boys donne de cette anomalie pour le Léman. Il la cherche dans la production de seiches propres au Grand-lac, seiches dont la période serait plus courte que celle des véritables binodales, altérerait cette dernière, la raccourcirait abusivement. M. Ed. Sarasin est disposé à accepter cette interprétation [1]. Mais il n'a pu encore, vu l'irrégularité extrême des seiches des lacs de Zurich et de Neuchâtel, donner une démonstration définitive de ces idées. Quant à moi, j'avoue ne pas pouvoir me faire une opinion sur ce problème, qui me semble devoir rester ouvert à des investigations ultérieures, aussi bien théoriques qu'expérimentales.

Les courants de l'Euripe de Chalcis.

Le problème des courants de l'Euripe a préoccupé les naturalistes de tous les temps, mais il était resté jusqu'à nos jours sans réponse satisfaisante. Il a fait tellement le désespoir d'Aristote que, si l'on croit la légende, apocryphe du reste, ce grand philosophe se serait jeté dans les flots, en poussant ce cri resté classique : « Que l'Euripe me prenne puisque

[1] [Loc. cit. p. 64, n° 31.]

je n'ai pu le tenir. » Strabon, Tite-Live, Sénèque, Pomponius Méla, Pline, Suidas, parmi les anciens, tous les auteurs et voyageurs modernes qui s'en sont occupés, ont renoncé à en trouver l'explication.

Voici comment je résumerai la question, d'après les observations du Jésuite français J.-P. Babin qui passa deux années, vers 1669, à Chalcis [1]. Ses données, reproduites en 1686 par le Vénitien Coronelli, et en 1703 par le Flamand Dapper, ont fait la base de toutes les descriptions modernes.

Sous le pont d'Egripo, l'ancienne Chalcis, qui fait communiquer par ses cinq arches et son pont-levis l'île d'Eubée (Négrepont) avec la Béotie, le détroit de l'Euripe montre presque constamment un courant très violent ; son intensité est telle qu'il fait jouer les roues de moulins à farine. Ce courant marche tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre ; mais le régime de ses changements de direction présente deux types essentiellement différents : parfois le courant est réglé, suivant l'expression consacrée, parfois il est déréglé.

Quand le courant est réglé, il change de direction quatre fois par jour synodique (jour lunaire de 24.8 heures) ; il offre ainsi deux flux et deux reflux correspondant évidemment à la double marée luni-solaire.

Quand le courant est déréglé, les changements de direction sont plus fréquents et représentent 11, 12, 13 et 14 reflux par 24 heures, et même plus. Le P. Babin a mesuré la durée de l'une de ces marées à courte période et l'a trouvée de 1 1/2 heure.

C'est à des jours déterminés qu'ont lieu ces deux régimes de l'Euripe. Le courant de l'Euripe est déréglé du 7e au 13e et du 21e au 26e jour du mois lunaire ; il est réglé le reste du temps. Ce que l'on doit traduire sous une forme moins impérative : le courant est en général réglé à l'époque des syzygies, en général déréglé à l'époque des quadratures.

L'amplitude de ces diverses marées est variable ; elle peut s'élever à un ou deux pieds.

J'ai publié en 1879 l'explication que je vais exposer de l'irrégularité

[1] Remarques sur le flux et reflux de l'Euripe, contenues dans une lettre à M. l'abbé Pecoil par le R. P. Babin, Jésuite. In *Spon et Wheler*, Voyage de Grèce, etc. II, 328 sq., Lyon, 1678.

des courants de l'Euripe [1]. Depuis lors, j'ai eu à disposition des documents plus précis qui n'ont fait que confirmer ma théorie.

C'est d'abord, avant tout, des lettres fort intéressantes, des tableaux d'observations, des cartes et plans que je dois à l'obligeance de M. le capitaine (aujourd'hui amiral) A.-L. Mansell. Cet officier de la marine britannique, en retraite à Chalcis depuis 1866, a étudié attentivement les courants et les marées de l'Euripe, et ses observations forment un riche matériel de documents de la plus haute valeur.

En 1882, le capitaine A.-A. Miaulis, de la marine grecque, a publié un mémoire, sur les courants de l'Euripe [2], dans lequel il combat mon explication, et attribue l'irrégularité des courants à l'action des sources d'Aidipsos, de Gialtra, des Thermopyles et des fleuves le Larymnos (Céphise) et le Sperchius. A côté de cette discussion polémique, dans laquelle je ne veux pas entrer ici, M. Miaulis donne une foule d'observations intéressantes sur le régime des courants de l'Euripe, sur les marées, etc. Il publie entr'autres les tableaux des observations de M. Mansell et des siennes propres qui représentent une bonne base expérimentale.

Enfin, en 1888, M. O. Krümmel a repris la question dans un article magistral [3] dans lequel il donne raison à ma théorie et fait du problème de l'Euripe le tableau le plus complet qu'on puisse avoir jusqu'à ce que des appareils marégraphiques, installés dans quelques stations, aient jugé définitivement la question.

Ces faits sont trop loin de notre lac pour que je les donne ici en détail ; je complèterai seulement la description que j'ai tirée du P. Babin, en ajoutant, d'après Mansell et Miaulis : Que la marée des solstices atteint une hauteur de 65^{cm}, celle des équinoxes 1.0^{m} ; que dans l'état déréglé, le nombre des oscillations de l'eau varie d'un jour à l'autre, que l'on y voit parfois 11 ou 12 vagues, d'autres fois 16 ou 18 vagues par 24 heures, ce qui représente des durées de 1 $^1/_2$ à 2 heures par vague [4] ; enfin, que dans le port du sud de Chalcis,

(1) [Loc. cit p. 63, n° 16.]

(2) [Loc. cit. p. 64, n° 23.]

(3) [Loc. cit. p. 64, n° 29.]

(4) M. Mansell approuve entièrement la description du P. Babin ; il la déclare la seule complète et la seule bonne. Voici en outre quelques phrases dans lesquelles M. Mansell décrit lui-même ce qu'il appelle la période irrégulière ou les courants déréglés des époques de quadrature : « Pendant cette période qui dure 2 ou

celui qui s'ouvre sur la mer Egée, il y a aussi des oscillations de l'eau, de type déréglé, de 14 à 16 vagues en 24 heures, en moyenne d'une durée de 1^h40^{min}.

Les faits étant ainsi constants, voici mon explication basée sur le phénomène des seiches. Il y a normalement deux variations périodiques de la hauteur de l'eau au détroit de Chalcis ; la première est due aux marées luni-solaires, dont la vague arrive de la mer Egée par l'Euripe d'Erethria, l'autre est due aux seiches du bassin fermé du canal de Talanti, qui s'étend au nord-ouest de Chalcis, entre l'Eubée et la Béotie, sur une longueur de 111^{km} jusqu'au fond du golfe de Zilani.

Ces deux variations périodiques, l'une de cause astronomique, l'autre de cause atmosphérique, se superposent, et un marégraphe établi à Chalcis dessinerait les deux courbes, brodant l'une sur l'autre, comme nous avons vu fig. 55, page 97, les seiches transversales du Léman broder sur les longitudinales, dans les tracés de Morges.

Or, suivant que l'eau est plus élevée d'un côté du détroit de l'Euripe que de l'autre, il se produit des courants tendant à égaliser cette différence de niveau, et marchant ou dans un sens ou dans l'autre. Une marée haute venant de la mer Egée tendra à déterminer un courant d'entrée dans l'Euripe (marchant du sud au nord), une seiche haute dans le canal de Talanti tendra à déterminer un courant de sortie de l'Euripe ; et l'inverse pour les marées basses et les seiches basses. Mais quelle qu'en soit l'origine, les courants ne se produisent que s'il y a différence effective de niveau.

Ces deux ordres de variations sont de hauteur différente suivant les circonstances. Les marées sont fortes aux syzygies, faibles aux quadratures ; les seiches sont hautes quand la pression atmosphérique est variable et quand le temps est orageux (voir au paragraphe subséquent). Suivant donc la hauteur relative des deux ordres de variations, l'une ou l'autre peut être prédominante, et celle-ci déterminera le

3 jours de suite, le courant coule très paresseusement, à raison de 1 $^1/_2$ à 3^{km} à l'heure (tandis que les courants réglés de syzygie marchent beaucoup plus vite, jusqu'à 13 $^1/_2{}^{km}$ l'heure) ; sa direction n'est déterminée par aucune règle ou loi que j'aie su découvrir. Parfois il reste stationnaire pendant une demi-heure, puis soudain il marche dans une autre direction pendant une demi-heure ou plus. Je l'ai vu parfois changer de direction 3 fois, et même dans quelques occasions jusqu'à 5 fois dans une heure, et cela sans cause apparente, le temps étant parfaitement calme et le ciel sans nuage. Dans d'autres occasions, je l'ai vu marcher du côté du sud pendant tout un jour, restant seulement stationnaire de temps en temps...» *Mansell, in litt.*, 28 avril 1880.

rythme des courants de l'Euripe. A l'époque des syzygies, ce doit être ordinairement les marées luni-solaires qui l'emportent ; à l'époque des quadratures, ce doit être les seiches, toutes choses égales d'ailleurs. C'est ainsi qu'aux syzygies, alors que les marées sont à leur maximum d'amplitude, il faudrait des seiches énormes pour qu'elles se dessinassent par les courants de l'Euripe, et les quatre inversions par jour synodique, du courant réglé sont la norme ; aux quadratures, quand la marée est très faible, les plus petites seiches peuvent la dépasser en hauteur, et ce sont les seiches qui déterminent les courants de l'Euripe ; le courant est déréglé.

Mais sont-ce bien des seiches, c'est-à-dire des vagues d'oscillation fixe en bassin limité qui causent les variations rapides du courant déréglé ? Cela semble probable. Nous connaissons le beau développement des seiches du Léman, avec la longueur de ce lac de 72^{km} et la profondeur de 310^{m} ; pourquoi n'y en aurait-il pas dans le bassin du canal de Talanti avec ses 111^{km} de longueur et ses 440^{m} de profondeur maximale ? Les seiches du premier ont une durée de 72 minutes, pourquoi celles du second n'auraient-elles pas la période un peu plus lente des courants déréglés. J'ai essayé d'y appliquer le calcul par le procédé P. du Boys (v. p. 123) en me basant sur la carte hydrographique publiée par M. Krümmel, établie d'après les cartes de l'Amirauté anglaise. J'ai trouvé que la seiche longitudinale uninodale du bassin de Talanti devrait avoir une durée d'environ 149^{min}, disons $2\ ^1/_2$ heures, la binodale 75^{min}, ou $1\ ^1/_4{}^{h}$; les plurinodales seraient naturellement plus courtes encore. Cette durée correspond assez bien à ce que nous savons des oscillations du courant déréglé de l'Euripe pour que nous puissions, avec toute probabilité, attribuer celles-ci à des seiches ([1]), en attendant que des tracés marégraphiques corrects nous permettent de formuler une conclusion définitive.

Quant aux seiches que M. Krümmel constate d'après les observations Mansell et Miaulis dans le détroit de l'Euripe d'Erethrie, au sud de Chalcis, elles doivent compliquer le phénomène des courants de l'Euripe ; mais nous n'en avons pas besoin pour la solution du problème.

Cette solution est très simple. Je la répète en la condensant : Quand

([1]) En somme les courants déréglés de l'Euripe seraient tout à fait analogues aux courants des seiches que j'observe au g o l é r o n du port de Morges (v. p. 53).

les courants de l'Euripe sont réglés à 4 changements de direction par jour synodique, ils sont dus à l'influence prédominante des marées luni-solaires ; cela a lieu surtout aux époques de syzygie. Quand ils sont déréglés, se sont les seiches du détroit de Talante, seiches uninodales, binodales ou plurinodales, suivant les circonstances, qui prédominent ; cela a lieu surtout aux époques des quadratures.

CAUSES DES SEICHES

Considérations générales sur les causes des seiches.

J'ai exposé, dans le premier paragraphe de ce chapitre, les différentes théories proposées pour expliquer le phénomène des seiches. Fatio de Duillier les attribuait à l'arrêt des eaux du Rhône sur le Banc-du-Travers, près de Genève, par les coups de vent du Midi. Addison et Jallabert y voyaient l'effet des crues subites des rivières ; le premier reconnaissait « une espèce de flux et reflux causé par la fonte des neiges qui y tombent l'après-midi en plus grande quantité qu'en d'autres heures du jour ; » pour le second, « les eaux du Rhône (au Bouveret) s'élèvent sur les rives, de part et d'autre, retombent ensuite par leur propre poids devenu supérieur à l'action des eaux du Rhône contre elles, et reprennent le niveau du reste du lac ; comme l'impétuosité du Rhône ainsi enflé subsiste un certain temps, il doit résulter de son action sur les eaux du lac, et de la réaction de celles-ci, un flux et reflux qui se succèdent à peu près comme les allées et venues d'un pendule. » Une explication analogue rend compte, d'après Jallabert, de la production des seiches à Genève par l'action des crues de l'Arve. Bertrand supposait que des nuées électriques peuvent attirer ou soulever les eaux du lac. H.-B. de Saussure admettait que des variations promptes et locales de la pesanteur de l'air peuvent produire des flux et reflux momentanés en occasionnant des pressions inégales sur les différentes parties du lac. Vaucher se rangeait à cette dernière opinion et la développait en l'appuyant sur de très ingénieuses considérations et d'excellentes observations. Arago, enfin, après avoir établi que les seiches peuvent avoir des

causes diverses, signalait dans la mer des oscillations analogues aux seiches et coïncidant avec des tremblements de terre. (1)

Je crois les idées de Bertrand, Saussure, Vaucher et Arago, exactes. Mais comme, depuis la publication du mémoire de Vaucher, le seul auteur qui ait traité cette question avec un peu de développements, nos théories sur les seiches se sont sensiblement modifiées par l'introduction de la notion du mouvement oscillatoire régulier et rythmique de l'eau, il y a lieu de reprendre la question et de l'appuyer sur des considérations nouvelles. Il y a, du reste, d'autres causes possibles et probables, non indiquées par les auteurs, et nous aurons à exposer et à développer ces nouvelles hypothèses.

Nous regardons les seiches comme étant des vagues d'oscillation fixe de l'eau qui balance suivant les diamètres principaux du lac.

Or, si nous voulons mettre en mouvement de balancement l'eau d'une cuvette, nous y arrivons par deux procédés différents : ou bien en laissant le bassin immobile et en donnant un choc à l'eau elle-même, ou bien en nous attaquant au bassin et en lui imprimant un choc convenable. De même pour les plus grandes masses d'eau de nos lacs ; elles peuvent être mises en mouvement par une secousse communiquée directement à l'eau, ou bien par une secousse du bassin même du lac dont l'ébranlement se transmet à l'eau.

Les actions qui peuvent donner directement à l'eau l'impulsion génératrice d'un mouvement de balancement doivent être cherchées dans l'atmosphère : variations de la pression, rupture de l'attraction électrique, coup de vent, etc., etc. Les actions qui ébranlent le bassin du lac et qui ne transmettent qu'indirectement le mouvement à l'eau sont les secousses de tremblement de terre.

Pour éviter un double développement des mêmes points et pour simplifier la description, je réunis dans les paragraphes suivants la critique théorique et la discussion expérimentale des divers faits qui se rapportent à ces deux ordres d'action.

Mais avant d'entrer en matière, j'insiste sur un point qui est trop souvent négligé ou mal compris, c'est que, comme l'a très bien dit Arago, il n'y a pas nécessairement une seule cause des sei-

(1) *F. Arago*, Sur les phénomènes de la Mer. Œuvres complètes, IX, 580 Paris, 1857.

ches, il y en a probablement plusieurs. La seiche étant un mouvement d'oscillation de balancement de l'eau, toute cause capable de déterminer ce mouvement particulier de l'eau occasionnera des seiches, dans des conditions favorables. De même que les vagues ordinaires, les vagues d'oscillation progressive peuvent être déterminées sur l'eau par le vent, par la marche d'un bateau sur l'eau ou d'un poisson dans l'eau, par la chute de la pluie, de la grêle, d'une pierre, etc., de même les seiches peuvent avoir des causes diverses et multiples. Parce que dans les paragraphes suivants j'énoncerai la possibilité et la probabilité de certaines causes, je n'entends point dire qu'elles soient les seules agissantes, et je n'ai point la prétention d'avoir épuisé la série des possibilités.

Statistique générale des seiches.

Commençons par étudier le développement des seiches en faisant une statistique générale qui nous donnera une idée des conditions de leur production.

Je m'adresserai pour cela à une année quelconque des observations limnographiques de Genève, que M. Ph. Plantamour a mises à ma disposition, avec une libéralité infatigable. Ainsi que je l'ai dit (page 142), j'ai apprécié la hauteur relative des seiches de l'année 1891 en mesurant, chaque jour, la seiche la plus forte et la seiche la plus faible, sans m'inquiéter du type de l'oscillation, qu'elle fût uninodale, binodale ou plurinodale. La moyenne arithmétique du maximum et du minimum de hauteur m'a donné la moyenne des seiches de la journée.

Tout d'abord apprécions la hauteur générale des seiches de cette station. Dans cette année 1891, les seiches ont eu :

Hauteur de	0	à	2cm	50 jours
—	2	à	4	162
—	4	à	6	90
—	6	à	8	33
—	8	à	10	16
—	10	à	12	5
—	12	à	14	1
—	14	à	16	2
—	16	à	18	2
—	18	à	20	4

Pendant 351 jours, la hauteur moyenne a été inférieure à 10cm ; pendant 14 jours, elle a été plus forte que cette valeur. Les seiches de 10cm et plus sont donc exceptionnelles, si l'on considère la valeur moyenne.

Mais je crois plus utile de m'adresser aux valeurs maximales, de mesurer la plus forte seiche de la journée quel qu'en soit le type. Je commencerai par donner dans un tableau général ces valeurs maximales journalières de l'année 1891 mesurées sur les tracés de Sécheron.

Valeur maximale journalière, en centimètres, des seiches de Sécheron. 1891.

	Janvier.	Février.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.	Septembre.	Octobre.	Novembre.	Décembre.
1	7	7	6	13	3	4	4	3	4	2	7	5
2	7	6	5	9	3	11	9	3	3	7	6	6
3	5	4	5	8	6	6	9	7	2	4	4	5
4	5	6	4	5	4	3	5	8	7	4	3	4
5	3	5	5	6	2	4	3	12	7	4	4	4
6	5	4	6	8	3	6	5	6	3	4	3	3
7	4	3	5	12	3	7	4	4	3	5	2	8
8	4	5	7	5	3	12	5	3	2	7	4	11
9	4	6	6	5	3	4	3	3	3	5	4	6
10	5	4	8	7	3	4	2	3	2	4	7	12
11	4	5	9	4	4	3	2	2	3	4	9	13
12	5	6	4	3	2	3	2	2	3	4	11	9
13	5	7	7	3	4	2	2	3	2	8	31	14
14	9	6	5	3	2	2	3	3	16	7	24	19
15	8	5	7	3	3	4	3	2	11	5	14	15
16	7	5	7	3	7	6	4	4	6	10	10	10
17	4	7	8	4	6	3	3	3	4	13	7	11
18	3	6	12	4	5	3	3	16	4	8	9	6
19	3	4	12	4	10	3	10	16	2	5	6	3
20	6	4	6	2	9	6	8	9	3	7	4	5
21	9	4	6	2	11	4	4	14	7	12	4	7
22	7	5	3	2	11	3	2	13	16	6	4	7
23	8	4	3	4	9	3	5	6	10	6	5	6
24	10	5	4	4	6	5	2	6	4	10	12	6
25	8	6	4	4	10	5	2	6	5	9	8	8
26	6	4	19	4	10	3	2	4	4	9	6	6
27	5	5	23	4	7	3	12	3	9	7	4	6
28	5	5	23	3	4	2	5	4	5	7	4	5
29	5		21	4	3	2	4	4	3	6	4	8
30	6		18	4	3	3	3	9	2	5	5	11
31	6		17		2		3	8		5		10

Pour utiliser ces chiffres, je commencerai par les grouper en valeurs mensuelles et saisonnières ; et pour être plus complet, et pour permettre une comparaison, peut-être intéressante, je donnerai en même temps les moyennes des minimums, celles des maximums et celles des moyennes journalières de hauteur des seiches dans la station de Sécheron pour cette année 1891.

Hauteur des seiches en centimètres.

	Minimums.	Maximums.	*Moyennes.*
Janvier	3.2	5.7	4.4
Février	2.9	5.1	4.0
Mars	5.3	8.9	7.1
Avril	2.9	4.9	3.9
Mai	2.9	5.2	4.0
Juin	1.9	4.3	3.1
Juillet	2.0	4.3	3.2
Août	2.8	6.1	4.4
Septembre	2.6	5.2	3.9
Octobre	3.5	6.4	4.9
Novembre	3.5	7.5	5.5
Décembre	4.3	8.0	6.1
Hiver	3.5	6.9	4.8
Printemps	3.7	6.3	5.0
Eté	2.3	4.9	3.6
Automne	3.2	6.4	4.8
Année	3.1	6.0	4.5

On voit de suite, d'après ces chiffres, que la hauteur des seiches varie d'un mois et d'une saison à l'autre ; elle a été, en 1891, la plus forte en mars et au printemps, la plus faible en juin et en été.

Revenons à notre tableau des hauteurs maximales journalières des seiches de la page 171. Groupons-en les valeurs en séries de 5 en 5 centimètres, nous obtenons le résumé suivant :

Valeurs maximales des seiches (Nombre de jours).

	de 0 à 5cm	6-10cm	11-15cm	16-20cm	plus de 20cm
Janvier	17	14	—	—	—
Février	18	10	—	—	—
Mars	11	12	2	3	3
Avril	23	5	2	—	—
Mai	19	10	2	—	—
Juin	23	5	2	—	—
Juillet	26	4	1	—	—
Août	17	9	3	2	—
Septembre	21	5	2	2	—
Octobre	14	15	2	—	—
Novembre	15	10	3	—	2
Décembre	8	15	7	1	—
Année	212	114	26	8	5

Pendant 212 jours, soit 59 % de l'année, les plus fortes seiches de la journée n'ont pas dépassé 5cm ; pendant 114 jours, soit 31 %, elles ont eu une valeur maximale de 6 à 10cm ; pendant 26 jours, soit 7 %, leur valeur a été de 11 à 15cm, pendant 13 jours, soit 3 % de l'année, elles ont dépassé 15cm. Les seiches ont, dans cette année, été le plus souvent au-dessous de 6cm ; dans trois mois seulement, mars, octobre et décembre, les seiches ont été le plus souvent au-dessus de 5cm.

Il y a donc des différences sensibles dans la hauteur des seiches suivant les mois et les saisons.

Si nous reprenons les chiffres des valeurs journalières, nous constatons que pendant de longues séries de jours, les seiches sont très faibles, que pendant d'autres séries, les seiches sont fortes. Comme exemple de seiches faibles, je citerai la période du 11 avril au 15 mai pendant laquelle le maximum de hauteur a atteint un seul jour la valeur de 6cm ; ou aussi la période du 9 juin au 1er juillet où il n'y a eu que deux jours des seiches de 6cm, tous les autres jours n'ayant eu que des seiches plus basses. Comme exemples de seiches fortes, je citerai la période du 13 au 28 octobre, où les seiches ont eu pendant

2 jours seulement la valeur de 5^{cm}, tous les autres jours étant plus élevés; ou encore la période du 7 au 31 décembre, dans laquelle nous trouvons 3 jours seulement où les seiches ont eu moins de 6^{cm}. (Je reviendrai plus loin sur la période du 26 mars au 3 avril.)

Les actions atmosphériques, causes des seiches.

Notre statistique générale nous montre les seiches se développant avec plus ou moins d'intensité suivant certaines périodes qui semblent accidentelles. Recherchons maintenant quelles sont les actions atmosphériques qui président au développement des seiches ; nous étudierons ensuite les relations, s'il y en a, des seiches avec les phénomènes sismiques.

Les seiches et le temps météorologique.

Si je me fonde sur une expérience de vingt années, pendant lesquelles j'ai suivi avec attention les allures des seiches du Léman, je formulerai comme suit les conditions générales du développement de cette oscillation du lac : Quand le temps est beau, les seiches sont faibles; quand le temps est mauvais, les seiches sont fortes. Mais ces termes sont trop vagues ; ils demandent a être précisés.

En effet, les seiches étant un mouvement de balancement des eaux du lac, qui, après une première impulsion génératrice, continuent à osciller pendant des heures et des journées comme un pendule revenant lentement au repos, le temps météorologique peut fort bien changer de caractère pendant la durée d'une série de seiches ; les conditions du développement de l'oscillation peuvent avoir disparu depuis longtemps et l'eau continuer encore son mouvement de balancement. C'est ainsi que dans la belle série des seiches du 26 mars au 3 avril 1891, le temps a été très mauvais pendant les premiers jours, mais il s'est calmé, et est revenu au beau à la fin de la série. Il y a donc lieu de corriger notre formule, et de dire : Les séries de seiches se développent plus fortes quand le temps est mauvais que quand il est beau.

Mais encore que signifient ces mots beau temps et mauvais temps? Leur valeur est trop différente suivant les intérêts en jeu pour qu'il ne faille pas mieux préciser nos termes. En effet, un temps de pluie et de neige peut être pour certaines personnes un mauvais temps ; et cependant la pluie en elle-même, c'est-à-dire la condensation en gouttes d'eau, la neige, c'est-à-dire la condensation en cristaux de glace des vésicules aqueuses d'un brouillard, ne sauraient être la cause des seiches. Un temps froid peut être pour certaines gens un mauvais temps ; et cependant le froid, c'est-à-dire une température de l'air inférieure à la normale de la saison, ne saurait avoir d'effet sur le balancement de l'eau. Le vent surtout s'il est fort, s'il accompagne la pluie et le froid, peut-être un mauvais temps ; le vent est-il la cause des seiches ? Nous aurons à discuter ce point plus tard. Nous devons donc réformer l'appellation de mauvais temps, et dire : Les perturbations atmosphériques, et en particulier les orages, sont la cause ordinaire des seiches.

Cette impression générale énoncée, je dois l'analyser et la formuler d'une manière plus précise ; pour cela, je la décomposerai en un certain nombre de propositions.

1° Y a-t-il des relations entre la grandeur des seiches et l'état de la pression atmosphérique ? Pour répondre à cette question, j'ai fait le travail suivant : Sur les tracés du limnographe de Morges, du 20 mars au 31 août 1876, soit pendant 165 jours, j'ai mesuré pour chaque heure la valeur des seiches apréciée en millimètres ; j'ai réuni ces chiffres par groupes de six heures, de minuit à 6 heures, de 6 à 12 heures, etc., et j'en ai pris la moyenne. D'un autre côté j'ai pris les observations barométriques journalières de l'Observatoire de Lausanne, où les lectures se font à 7^h, 13^h et 21^h ; par interpolation j'en ai déduit pour chaque jour la hauteur aux heures de minuit, 6, 12 et 18 heures. J'ai obtenu ainsi deux séries de chiffres parallèles, exprimant pour chaque période de six heures la hauteur du baromètre et l'amplitude des seiches. Cela fait, j'ai ordonné les chiffres de la grandeur des seiches suivant la hauteur du baromètre, et j'ai obtenu le tableau suivant :

Baromètre.	Nombre d'observations.	Grandeur des seiches.	Moyenne de grandeur	Baromètre.	Nombre d'observations.	Grandeur des seiches.	Moyenne de grandeur.
mm		mm	mm	mm		mm	mm
724	1	10		712	33	9	12
723	14	3		711	28	19	
722	29	4		710	30	17	
721	39	5	4	709	16	11	
720	47	4		708	4	15	
719	71	4		707	10	18	18
718	85	7		706	11	20	
717	64	14	8	705	7	25	
716	36	7		704	—	—	
715	39	7		703	2	22	
714	38	7		702	2	7	
713	26	8		701	1	10	

Dans la dernière colonne j'ai tiré les moyennes de grandeur des seiches, en groupant les valeurs par séries de 5 en 5 millimètres de hauteur du baromètre ; j'ai laissé de côté les extrêmes de 724, 701, 702 et 703mm, pour lesquelles j'ai trop peu d'observations.

De 705 à 709mm	du baromètre	18mm	de hauteur des seiches
710 à 714	»	12	»
715 à 719	»	8	»
720 à 723	»	4	»

J'ai fait le même calcul pour les seiches de Genève de l'année 1891 en les comparant à la hauteur du baromètre de l'Observatoire, et j'ai obtenu pour les hauteurs moyennes des seiches :

Baromètre.	Seiches.	Nomb. d'observ.	*Moyennes.*
714mm	82mm		
15	122		
16	66	32	62mm
17	49		
18	62		
19	51		
20	56		
21	61		
22	65	92	55
23	63		
24	34		

Baromètre.	Seiches.	Nomb. d'observ.	Moyennes.
725mm	44mm		
26	36		
27	46	132	39
28	42		
29	36		
30	43		
31	33		
32	51	79	42
33	45		
34	40		
35	38		
36	37		
37	37	30	40
38	48		
39	42		
40	45		

Ou en résumé :

De 714 à 724mm du baromètre 56mm de hauteur moyenne des seiches
725 à 740 — 40 —

Considérés ainsi, ces chiffres laissent voir une loi très bien évidente, c'est que la grandeur des seiches est d'autant plus forte que le baromètre est plus bas. Mais si l'on n'étudiait ces chiffres que sous la forme de résumé et de moyennes, l'on prendrait une idée très fausse des allures du phénomène ; en effet, cette loi, bien apparente dans les moyennes, échappe très souvent dans les observations isolées ; elle a un nombre énorme d'exceptions. On peut déjà se rendre compte de cela dans notre tableau des seiches de Morges, de la page 176, en considérant les hauteurs extrêmes du baromètre ; le baromètre le plus bas, par 701mm, a donné la même valeur pour la grandeur des seiches, 10mm, que le baromètre le plus élevé, par 724 millimètres. Voici du reste, pour mieux montrer ces allures des seiches, quelques chiffres donnant en millimètres la hauteur des seiches dans trois séries de moyennes de six heures, correspondant à trois hauteurs du baromètre :

Baromètre.	Amplitude des seiches de Morges.																					
720mm	0.	7.	8.	8.	2.	0.	5.	17.	7.	2.	8.	5.	3.	7.	2.	2.	3.	2.	3.	2.	0	2. etc.
715	12.	20.	12.	8.	25.	18.	2.	3.	10.	0.	0.	8.	2.	10.	7.	10.	2.	1.	8.	1.	etc.	
710	12.	12.	10.	12.	20.	12.	32.	33.	47.	28	10.	2.	27.	30.	15.	4.	etc.					

Comme on le voit, les exceptions ou les irrégularités sont très nom-

breuses et souvent très choquantes. Il convient donc de formuler notre loi dans les termes les plus vagues, et de dire : D'une manière générale, la grandeur des seiches a une tendance marquée à être plus forte quand le baromètre est bas que quand il est haut.

2° Y a-t-il des relations entre la grandeur des seiches et les variations du baromètre ? J'ai dû étudier ce point avec attention, car si les seiches sont un mouvement de l'eau, mise en agitation par l'atmosphère, les variations de la pression atmosphérique devraient avoir action de cause à effet. La question se formule dans ces termes : Les seiches sont-elles plus fortes ou moins fortes quand le baromètre est immobile, quand il hausse ou quand il baisse? Pour y répondre, j'ai utilisé les deux séries de chiffres que j'ai obtenues quand j'ai étudié les rapports entre la hauteur du baromètre et la grandeur des seiches de Morges (page 176). Prenant les hauteurs du baromètre à Lausanne par interpolation pour les quatre heures équidistantes de la journée, j'ai fait la différence entre les deux valeurs successives, et j'ai eu ainsi, pour chaque période de 6 heures, le signe et la valeur de la variation du baromètre en dixièmes de millimètres de mercure. J'ai alors ordonné la hauteur moyenne des seiches de Morges des différentes périodes de 6 heures, d'après la variation du baromètre, et j'ai obtenu le tableau que j'ai publié à la page 143 de mon mémoire sur les Causes des seiches [1]. Je ne le reproduis pas ici, car il est trop encombrant et ses résultats ne sont pas assez précis. On en jugera par le résumé que j'en donnerai en groupant les variations barométriques en valeurs de 1 millimètre de hauteur, et en tirant les moyennes de grandeur des seiches pour ces différentes variations :

Variation du baromètre.	Nombre d'observations.	Hauteur moyenne des seiches.
De + 2.1 à + 3.3mm	12	6.6mm
+ 1.1 à + 2.0	61	8.0
+ 0.1 à + 1.0	234	8.5
± 0.0	32	10.0
— 0.1 à — 1.0	226	6.7
— 1.1 à — 2.0	65	9.8
— 2.1 à — 2.9	10	10.0

[1] Loc. cit. [p. 63, n° 11.]

Ou en résumant encore plus :

	Nombre d'observations.	Hauteur moyenne des seiches.
Baromètre en hausse	307	8.0mm
— immobile	32	10.0
— en baisse	301	7.4

Ces chiffres varient bien peu dans les moyennes. Quant aux observations isolées, il y a encore bien plus de divergences que nous ne l'avons vu quand nous avons ordonné l'amplitude des seiches d'après la hauteur absolue du baromètre. Voici du reste un exemple choisi dans la série où la variation du baromètre dans la période de six heures a été de $+ 0,1^{mm}$; l'amplitude des seiches dans les différentes périodes de six heures a été en millimètres de :

8, 2, 0, 2, 7, 10, 13, 2, 2, 3, 20, 67, 17, etc.

Quant aux moyennes, si on voulait essayer d'interpréter leur signification, voici le résultat auquel on arriverait : l'amplitude des seiches serait plus forte quand le baromètre reste immobile que quand il varie. La grandeur des seiches serait plus forte quand le baromètre monte que quand il baisse.

Mais ces conclusions positives ne me semblent pas autorisées par les chiffres que je viens de donner. J'estime que la variation des moyennes est trop peu considérable, que le sens même de cette variation est trop peu accentué, pour justifier une conclusion de cette nature. En revanche, je crois pouvoir en tirer une conclusion négative, qui a une certaine importance en ce qu'elle réfute une idée très généralement répandue ; je la formulerai en ces termes : L'amplitude des seiches n'est pas plus forte lorsque le baromètre varie en s'élevant ou en s'abaissant que lorsqu'il reste immobile.

Autrement dit : L'amplitude des seiches est sans relations nécessaires et constantes avec les variations générales de hauteur du baromètre.

3° Les variations générales de la pression atmosphérique ne nous donnant aucun indice sur la cause des seiches, trouvons une autre méthode.

Nous chercherons sur nos tracés limnographiques les cas où une série de seiches commence plus ou moins subitement, où il y a une impulsion nette et bien dessinée ; puis nous rechercherons les conditions météorologiques de cet instant, et nous constaterons s'il y a ou s'il n'y a pas quelque chose de spécial dans ces conditions météorologiques.

Je choisirai pour faire cette étude les tracés de la station de Morges, où les seiches à courte période apparaissent parfois brusquement, et forment d'une manière indiscutable le début d'une série. La figure 55, p. 97, est un bon exemple de ce début subit de seiches transversales ; j'en ai cinquante aussi clairs dans mes tracés de Morges.

Je mettrai en regard de ces valeurs de seiches, l'état météorologique de la vallée du Léman tel qu'il est constaté par les notes de l'Observatoire de Genève dans les cahiers mensuels des Archives. (1)

Seiches.	Notes météorologiques.
N° 1876	
1. *Mars 29.* 11h 30. Série de transversales de 4cm.	Très forte averse accompagnée de grêle à 10 3/4h ; en même temps éclairs et tonnerres à plusieurs reprises du côté du Nord.
2. *Avril 11.* 21h. Début de seiches de 3 1/2cm. ; 22h 30, nouvelle série de seiches de 5 1/2 cm.	Vent du S.-O. souffle avec force depuis le 10 à 12h jusqu'au 11 à 17h.
3. *Avril 16.* 21h. Début de fortes seiches de 7cm.	Aucune note spéciale.
4. *Avril 19.* 18h. Série de seiches de 5cm.	A 17 1/4h, pluie et grêle.
5. *Avril 29.* 2h. Série de seiches de 4 1/2cm.	A 17 1/4h éclairs et tonnerres, forte averse mêlée de grêle.
6. *Juillet 24.* 2h. Seiches transversales de 3cm. Début d'une grande série de longitudinales	Depuis 14h jusqu'à 21h, succession d'orages sur toute la vallée.
7. *Août 19.* 19h. Seiches de 2 1/2cm.	Dans la soirée du 19, à 23h, succession d'orages ; on entend le tonnerre à plusieurs reprises.
8. *Août 22.* 1h. Début subit de très grandes seiches de 10 1/2 cm.	A 0 3/4h, pendant une demi-heure, pluie torrentielle accompagnée de violents coups de vent et d'éclairs et tonnerres se succédant sans interruption.

(1) Il eût certainement été préférable d'étudier cet état météorologique dans les observations de Morges ou de Lausanne ; mais pour ces années, les notes de l'Observatoire de Genève sont plus claires, plus abordables et plus faciles à consulter. La distance de 45km qui sépare Genève de notre région moyenne du Grand-lac n'est pas assez grande pour que l'état météorologique des deux localités soit très différent.

N°	Seiches.	Notes météorologiques.
9.	*Septembre 28.* 17h. Début d'une série de seiches de 6 1/2 cm.	Fort orage de 16 3/4h à 18h. La foudre a frappé en plusieurs points de Genève; toute la soirée, éclairs tout le tour de l'horizon.
10.	*Septembre 30.* 17h. Seiches de 5 cm.	De 16 1/4h à 17 3/4h, éclairs et tonnerres.
11.	*Octobre 5.* A 5h, seiches de 5 cm.	Pas de note spéciale.
12.	*Octobre 10.* A 18h. début subit de belles seiches de 7 1/2 cm.	Orages dans la nuit, vers 3h. Un second orage éclate dans l'après-midi, éclairs et tonnerres depuis 16 3/4h au S.-O. jusqu'à 19h au N.-E. A 18h. l'orage est sur la ville de Genève.
13.	*Décembre 4-5.* Grandes seiches longitudinales.	*4 décembre.* Vent violent de S.-S.-O.
14.	*Décembre 7.* A 12h, seiches de 5 cm.	A 9 3/4h, éclairs du côté du N.
	Décembre 20. 13 1/2h. Seiches de 4 1/2 cm.	A 11h, chute de neige, pluie et grésil; A 13 3/4h, éclairs et tonnerres au N.-O. de Genève.
	1877	
15.	*Janvier 1.* 18h, Seiches transversales de 3 cm.	Fort vent du S.-O. tout le jour, avec température exceptionnellement élevée.
16.	*Janvier 30.* 22h, forte dénivellation. Début de seiches longitudinales.	Le soir, fort vent de S.-S.-O; les nuages sont chassés avec grande rapidité par un vent du N.-O.
17.	*Avril 4.* 0h, seiches de 6 cm. 15h, nouvelle série de 5 1/2 cm. 21h, nouvelle série de 4 cm.	Le 3 avril, à 18 1/4h, roulements de tonnerre. Le 4 avril à 14 1/2h, éclairs et tonnerres au S.-O; à 21h, violent coup de vent du S.-O. immédiatement suivi d'une forte averse; éclairs et tonnerres.
18.	*Mai 12.* A 19h, série de seiches de 5 cm.	A 18 1/2h, éclairs et tonnerres.
19.	*Juin 1.* A 13h, série de seiches de 4. 1/2 cm.	De 12 à 12 1/2h, violents coups de vent du S.-S.-O., suivis de pluie et de plusieurs coups de tonnerre.

N°	Seiches.	Notes météorologiques.
20.	*Juin 5.* A 19h, série de seiches de 2. 1/2 cm. *Juin 6.* A 1h, série de seiches de 4.5 cm; à 7h, nouvelle série de seiches de 7 cm.	Le 5 juin, de 17 1/2h à 18 1/2h, éclairs et tonnerres, grêle, pluie; toute la soirée éclairs fréquents. A minuit très forte pluie accompagnée d'éclairs et tonnerres. Le 6 juin à 4 1/2h, orage, éclairs, tonnerres pluie.
21.	Du 5 *juillet* à 16h au *6 juillet* à 18h, plusieurs séries de seiches se succèdent en s'enchevêtrant.	Depuis 16 3/4h le 5 *Juillet*, pendant la soirée et jusque fort avant dans la nuit, succession d'orages venant du S.-E., du S. et du S.-O Vers 21 1/2h plusieurs tonnerres. Le *6 juillet*, de 11 3/4h à 18 1/4h, succession d'orages
22.	*Juillet 14.* A 14h, seiches transversales de 2 1/2 cm. Début de seiches longitudinales.	De 13 à 15 1/2h, succession d'orages suivant la direction du S.-O. au N.-E. Violentes décharges électriques vers 13h, 20h, etc.
23.	*Juillet 24.* A 20h, série de seiches de 4.5 cm.	A 21 1/4h, violent orage suivant la direction du S.-O. au N.-E.; décharges électriques.
24.	*Août 1.* A 16h, seiches de 3 cm.	De 15 3/4h à 17h, éclairs et tonnerres. L'orage passe du S. O. au N. Coups de vent de O.-S.-O. très violents. Forte averse.
25.	*Août 21.* A 20h, superbe série d'uninodales transversales de 12 1/2 cm. Nombreuses séries de seiches, très fortes jusqu'au 23 août à 14h.	Le *21 août*, de 19h à 22 1/2h, fort orage ou plutôt succession d'orages. A 20 1/2h le ciel est embrasé de tous les côtés. Orages le *22 août*, de 1 à 3h, de 6 à 7h, de 20 à 21h; le *23 août*, de 7 à 8h.
26.	*Septembre 8.* A 2h, série de seiches de 7cm ; à 17h, nouvelle série de seiches de 5 1/2 cm.	De 14 à 15 1/2h, éclairs et tonnerres vers le N. Nouvel orage de 19 1/2h à 21 1/2h, etc.
27.	*Novembre 25.* A 8h. énormes seiches longitudinales.	Violent orage vers 0 1/2h. Eclairs et tonnerres très serrés.
	Etc., etc.	Etc., etc.

Je m'arrête dans cette énumération ; en la continuant, je trouverais toujours les mêmes faits, à savoir :

a. La coïncidence très fréquente, presque constante des grandes sei-

ches avec un temps orageux (orage parfait, orage électrique) : 20 cas sur 27 dans les exemples ci-dessus.

b. L'existence cependant de seiches bien développées, sans qu'aucune note de l'observatoire de Genève ne signale une perturbation météorologique (N°s 3 et 11).

c. Quelques exemples de seiches importantes par des vents violents, mais sans qu'orage ait été noté (N°s 2, 4, 13, 15, 16).

d. L'absence de seiches extraordinaires dans nombre de cas où l'orage est indiqué dans les notes météorologiques de Genève. Il peut y avoir orage, et même orage violent dans notre pays, sans que nécessairement le lac réagisse par des mouvements de balancement extraordinaires. Un exemple des plus frappants est celui du grand ouragan cyclone du 19 août 1890 qui a traversé le Jura français et vaudois, de St-Claude à Romainmôtier, à quelques lieues du lac, en faisant une des perturbations les plus épouvantables qui aient bouleversé la contrée. Ce jour-là, les seiches n'ont pas été extraordinaires ; elles avaient, au moment du cyclone, seulement 3^cm^ de hauteur à Genève (1) (limnographe de Sécheron). Il y a eu des séries de seiches le 19 août, débutant à 1^h^, à 6^h^ et à 11^h^. Cependant les limnographes de Sécheron et de Thonon n'indiquent aucune impulsion spéciale causée à 20^h^ par le passage du cyclone derrière la Dôle. Le 20 août, à 4^h^, les seiches ont repris avec une plus grande intensité ; mais la grande impulsion a été donnée à 8^h^ seulement et cela avec une puissance telle que le limnographe de Sécheron a enregistré des oscillations de 63^cm^, et celui de Thonon de 13.5^cm^ (2). Ces énormes seiches du 20 août n'ont pas été dues au cyclone, elles ont eu une autre cause, comme nous le verrons bientôt. — Il ne suffit donc pas qu'il y ait un ouragan ou un orage dans la vallée, quelque violent qu'il soit, pour qu'il y ait développement de fortes seiches. L'expérience nous apprend qu'il faut que l'orage frappe sur le lac. Un orage éclatant sur le lac peut y produire de grandes seiches ; un orage frappant sur terre ferme, à côté du lac, peut rester sans effet sur le balancement de l'eau.

Il est évident, d'après les faits ainsi résumés, que les plus fortes seiches sont dues à l'orage complet, l'orage avec son cortège de manifestations mécaniques, thermiques et électriques ; que ce phénomène

(1) *Ph. Plantamour* [loc. cit. p. 64, n° 31].

(2) *F.-A. Forel* [loc. cit. p. 64, n° 30].

n'est pas le seul à causer des seiches; qu'il y a des seiches en l'absence de toute décharge électrique. Ce dernier point, très important, je le prouve en considérant l'existence de seiches en tous temps, de seiches peut-être de faible grandeur, mais cependant parfaitement reconnaissables en hiver, dans cette saison où les orages sont extrêmement rares ([1]). Voyez à ce sujet notre tableau de la hauteur des seiches de l'année 1891 qui donne une moyenne de 4.8^{cm} pour la hauteur des seiches de Genève, dans les mois de décembre à février.

Ainsi donc : existence des seiches en tous temps; exagération des seiches en cas de vent violent; seiches d'intensité maximale en temps d'orage. Voilà les faits généraux d'où nous devons tirer l'explication des seiches.

Les seiches et l'orage.

L'orage est, comme nous l'avons dit ([2]), une perturbation atmosphérique présentant comme phénomènes constituants un coup de vent, des variations de température, des condensations aqueuses et des décharges électriques; l'orage peut être parfait et tous les phénomènes secondaires y sont représentés; l'orage peut être incomplet et nous n'avons qu'un orage de vent, un orage de pluie ou de grêle, un orage électrique.

Quels sont, dans ces phénomènes constituants de l'orage, ceux qui peuvent produire les seiches?

A. L'attraction des nuées chargées d'électricité peut soulever l'eau à l'une des extrémités du lac (hypothèse de Bertrand, appuyée par H.-B. de Saussure, admise aussi par mon regretté collègue, le professeur Louis Dufour, de Lausanne, qui m'a plusieurs fois exprimé verbalement cette opinion, acceptée aussi par M. Ph. Plantamour dans son étude sur les seiches du 20 février 1879 ([3])); puis la décharge de la foudre, supprimant subitement une partie de la force attractive, laisse retomber l'eau. Nous ne pouvons pas, que je le sache, apprécier la

([1]) V. t. I, p. 339. Nous avons vu qu'en hiver il n'y a que 0.4 jour à orage par année moyenne.

([2]) T. I, p. 330.

([3]) [Loc. cit. p. 63, n° 18] p. 343.

valeur effective d'une attraction de cette nature ; mais il n'y a pas d'impossibilité à ce que les choses se passent ainsi. Nous pouvons admettre que ces deux corps mobiles, la surface liquide du lac et le nuage, chargés l'un et l'autre d'électricité, s'attirent réciproquement ; qu'au moment où la foudre opère la neutralisation des électricités de signes contraires, cette action d'attraction cessant, l'eau retombe subitement ; qu'il peut en résulter l'impulsion génératrice d'une série de seiches. Voici ce que la théorie peut admettre.

Nous venons de voir la coïncidence frappante entre les orages et les seiches ; nous avons constaté que les grandes séries de seiches correspondent le plus souvent avec l'éclat d'un orage sur le lac ou dans la vallée. Il y a donc des arguments de fait qui parlent en faveur de cette idée. Nous avons cependant quelques remarques à indiquer :

a. Les orages électriques éclatant sur le lac ne sont pas toujours accompagnés de fortes seiches. A cette objection on peut répondre que l'intensité de l'attraction électrique peut n'être pas toujours de même valeur, ou bien qu'elle peut s'être exercée sur un point du lac peu favorable à la mise de l'eau en état de balancement.

b. Les seiches existent aussi bien en hiver, où il n'y a pas d'orages électriques, qu'en été où ils sont fréquents. — Cela prouve qu'en tout cas l'orage électrique n'est pas la cause unique des seiches.

c. En troisième lieu, je remarque que les seiches observées en temps d'orage électrique ne présentent pas toujours le type caractéristique qu'elles devraient avoir si la rupture de l'attraction électrique était la cause de ces séries de seiches ; en effet, si la théorie que je viens d'exposer était exacte, à chaque coup de foudre devrait correspondre une impulsion génératrice de seiches, à chaque coup de foudre devrait commencer une série de seiches. Les seiches, simples au premier coup de foudre, devraient par conséquent se compliquer à chaque éclair, et toutes ces séries de seiches interférant successivement les unes sur les autres, le tracé devrait présenter un type spécial et caractérisé par sa complication extrême.

Or ce type de seiches ne se retrouve nullement d'une manière constante en temps d'orage ; souvent, dès le début, l'impulsion est simple et semble causée par une action unique et non multiple. Nous avons vu que les seiches peuvent être irrégulières et compliquées ; c'est quelquefois le cas au début d'une série de seiches au moment où frappe l'orage, et cela correspondrait bien à l'hypothèse de Ber-

trand. Quant à la régularisation ultérieure des séries de seiches, qui d'irrégulières deviennent simples, elle s'expliquerait facilement. Quelques-unes des seiches secondaires du début s'éteindraient, d'autres se fondraient dans des seiches voisines ; les battements entrechoqués du mouvement pendulaire se simplifieraient, et au bout d'un certain temps il ne resterait plus, en oscillation simultanée, que les seiches de types supérieurs, ou les uninodales, ou les binodales, quelquefois les deux types interférant ensemble.

En résumé, je ne me refuse pas à admettre l'hypothèse de Bertrand qui satisfait en partie aux faits de statistique ; ceux ci donnent une fréquence et une grandeur plus grande des seiches en temps d'orage. Mais je constate qu'elle n'est pas suffisante pour expliquer toutes les seiches, en particulier celles qui apparaissent en dehors des temps d'orage.

B. Je laisserai entièrement de côté les phénomènes thermiques et hygrométriques qui accompagnent l'orage. Que l'air se réchauffe ou se refroidisse, que la vapeur d'eau se condense en vésicules de brouillard, en gouttes d'eau, en cristaux de neige, en grains de grésil ou de grêle, cela ne peut affecter en rien l'équilibre de l'eau ou la mettre en oscillation de balancement. Tout au plus la chute de la pluie et de la grêle, par le courant d'air vertical descendant qu'elle occasionne, peut-elle produire une dépression locale de la surface du lac ; mais cela rentre dans la catégorie du vent et des variations de la pression atmosphérique que nous allons traiter à l'instant.

C. Arrivons aux phénomènes mécaniques qui caractérisent l'orage, aux mouvements de l'air, au vent. La perturbation atmosphérique de l'orage, que celui-ci soit simple ou compliqué, parfait ou imparfait, est toujours accompagnée du déplacement de l'air ; parfois même, la perturbation est uniquement un tourbillon d'air. Nous avons vu [1] que ces mouvements de l'air peuvent avoir deux formes générales. Ou bien, c'est un mouvement centrifuge, dans l'orage local ; l'air tombe verticalement sous le nuage d'orage, frappe sur le sol, et s'irradie en s'éloignant du centre de l'orage. Ou bien c'est un mouvement centripète, dans les trombes, tornados, ouragans-cyclones ; l'air tourbillonne en spirale en se dirigeant vers le centre du cyclone où la pression atmosphérique est à son minimum. Si nous avions à faire ici la théorie de l'orage, nous devrions probablement diviser autrement notre

[1] T. I, p. 327.

étude ; nous aurions à considérer deux causes efficientes. D'une part les tourbillons du vent, quelle qu'en soit l'origine, à direction centripète dans les couches inférieures, qui déterminent vers le centre du tourbillon une dépression de la pression atmosphérique (T I, p. 311 et 329), et d'autre part, l'orage local qui, par la production subite du froid, quelle qu'en soit l'origine, amène une chute verticale d'air, et des vents centrifuges dans la couche inférieure de l'air, divergeant autour de l'orage (t. I, p. 330). Mais nous traitons ici des seiches, c'est-à-dire de l'effet de ces actions complexes sur le balancement de l'eau du lac ; nous avons, à ce que je crois, avantage à considérer les phénomènes à deux points de vue :

La variation locale de la pression atmosphérique.

Le courant d'air, soit le vent.

Les seiches et la variation locale de la pression atmosphérique.

Quelle que soit la forme de la perturbation atmosphérique, il y a variation locale de la pression barométrique, et partant il peut y avoir effet mécanique sur la masse d'eau du lac sous-jacent. Si sur un point du lac la pression est diminuée, il doit y avoir rupture de l'équilibre de l'eau, dénivellation de la nappe liquide ; l'eau doit s'élever au point où la pression est la plus faible, s'abaisser par conséquent sur le reste du lac. Si, au contraire, sur un point du lac la pression est augmentée, en ce point la dénivellation doit être une baisse locale ; l'eau doit être refoulée sur le reste du lac, lequel doit présenter en dehors du lieu de l'orage une crue correspondante.

Les variations locales de la pression doivent donc causer des dénivellations locales de la surface du lac. Si ces variations ne sont que passagères, si elles se déplacent, si la perturbation, après avoir sévi sur le lac, passe sur la terre-ferme et cesse par conséquent d'agir sur l'eau, la cause de dénivellation étant supprimée, l'équilibre tend à se rétablir, l'eau tend à reprendre son niveau. Mais, ainsi que nous l'avons vu par nos expériences de balancement dans des auges de petites dimensions, le rétablissement de l'état d'équilibre ne s'opère qu'à la suite de dénivellations alternatives au-dessus et au-dessous de l'horizontalité ; l'eau se met en balancement pendulaire ; dans le lac, il se détermine une série de seiches.

Notons cependant une condition essentielle pour la production de

ces mouvements de balancement de l'eau. Il faut que la rapidité de la variation de pression soit en rapport avec la durée du rythme de balancement de l'eau ; si la variation est plus lente que le mouvement, l'équilibre se rétablit sans oscillations alternatives, si elle est plus rapide, il se produit des oscillations de types plus compliqués, à deux ou plusieurs nœuds. Suivant donc les dimensions du lac qui déterminent le rythme des seiches, l'effet maximal sera obtenu lorsque la rapidité de la variation de pression sera telle que son développement ou sa disparition dureront la moitié du temps d'une seiche entière. Sur le Léman, les seiches longitudinales uninodales seront le mieux développées par une variation de pression atmosphérique de $\frac{73}{2}$ minutes, soit 36 minutes de durée.

Est-ce bien ainsi que les choses se passent ? Interrogeons l'expérience.

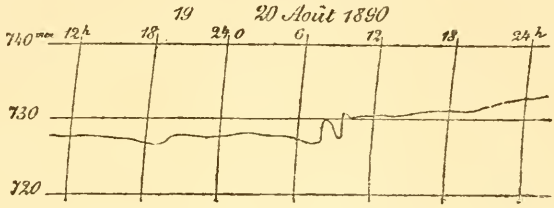
Les variations locales de la pression atmosphérique, telles que celles d'un orage, se traduisent sur le baromètre ; il y a variation barométrique dans un sens ou dans l'autre. Un tornado ou une trombe sont caractérisés par une baisse rapide du baromètre, suivie d'une hausse aussi rapide ; un orage local est signalé par une hausse subite du mercure suivie d'une baisse. Le premier cas est banal, je n'ai pas besoin d'en fournir d'exemples ; pour le second cas, je renvoie aux exemples de Hjeltström et de Riggenbach, que j'ai cités dans mon premier volume, p. 333.

Or l'expérience nous apprend que ces sautes subites du baromètre sont accompagnées de seiches. Dès le début de nos études sur les oscillations du lac, mon maître et ami, M. le professeur Ch. Dufour, de Morges, m'a prouvé qu'il y a de tels rapports. Chaque fois qu'il voyait le baromètre présenter une marche saccadée, monter ou baisser avec secousses, il pronostiquait des fortes seiches ; combien de fois, alors que je dirigeais mon limnographe de Morges, M. Dufour n'est-il pas venu me visiter en m'avertissant que l'état d'agitation de son baromètre lui faisait supposer qu'il devait y avoir de grandes seiches sur le lac, et l'étude de mes tracés limnographiques vérifiait toujours ces prévisions.

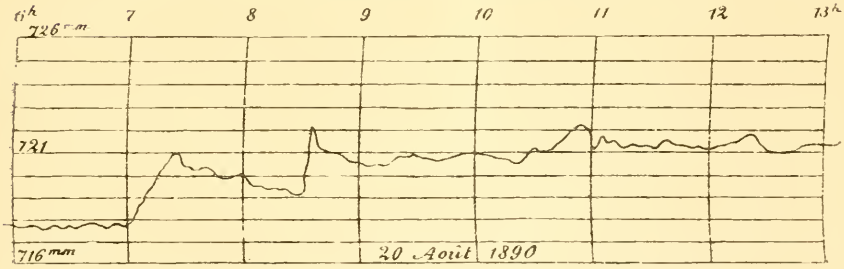
Depuis que nous possédons des baromètres enregistreurs, nous constatons cette coïncidence bien plus facilement. Quand le tracé du barographe présente des crochets, des secousses, des irrégularités, le lac consulté par le limnographe répond invariablement par l'existence

de fortes seiches. J'en donnerai comme exemple celui du 20 août 1890.

C'était le lendemain du cyclone de la vallée de Joux ; l'atmosphère était puissamment troublée. Après le terrible tourbillon qui, dans la soirée du 19 août, avait dévasté le Jura, il y eut, pendant toute la journée du 20 août, une série d'orages locaux. Voici à ce sujet les notes de l'Observatoire de Genève : « 20 août, à 6h50, éclairs et tonnerres à l'W. ; à 13h36, orage à W, de même à 14h13 ; nouvel orage au S.-W, à 15h10 ; éclairs à l'E. à 20 ½h. » Quant à la pression atmosphérique, elle était fort variable. Voici pour ce jour-là les tracés de deux baromètres enregistreurs : Celui de la colonne météorologique de la ville de Morges (petit Richard, fig. 78), communiqué par M. F. Girardet, donne



(Fig. 78.) Tracé du barographe de Morges, petit Richard, 20 août 1890.



(Fig. 79.) Tracé du barographe de Thonon, grand Richard, 20 août 1890.

entre autres, entre 8 et 10h, une hausse de 4mm, suivie d'une baisse de 3mm, suivie elle-même d'une hausse de 4mm. Celui du bureau des Ponts-et-Chaussées de Thonon (grand Richard), communiqué par M. l'ingénieur Delebecque, fig, 79, donne entre autres de 7h à 7h25, une hausse de 3mm, de 7h25 à 8h30, une baisse de 2mm, de 8h30 à 8h40, une hausse de 3mm. A Genève, M. Ph. Plantamour notait à 8h une forte et subite secousse du baromètre, en hausse de 2.5mm. D'après les allures de cette perturbation, il est évident que nous n'avons pas affaire à une variation générale de la pression, simultanée sur l'en-

semble de la vallée ; il y a eu plutôt un phénomène limité, tourbillon ou orage, qui s'est promené successivement sur diverses parties du lac, ce qui doit rentrer incontestablement dans la catégorie des perturbations ou variations locales. Pendant ce temps le lac était agité par les plus grandes seiches qui aient été enregistrées sur le lac, depuis l'année 1876 où des limnographes y ont été établis. La plus belle série a commencé à 8 heures et s'est développée, en apparence progressivement, jusqu'à 10^h30, pour décroître ensuite. Sur les tracés limnographiques de Sécheron on voit la hauteur des seiches successives rapportée à un niveau moyen dessiné au juger. Ce sont des seiches dicrotes assez irrégulières ; je n'indique ici que les principaux extrêmes de hauteur :

Seiches basses.		Seiches hautes.		Hauteur de la seiche.
7^h43^{min}	— 11^{cm}	8^h05^{min}	+ 20^{cm}	31^{cm}
8.52	— 23	9.33	+ 25	48
9.45	— 28	10.31	+ 34	62
11.08	— 21	11.49	+ 24	45
12.35	— 23	12.53	+ 30	53
etc.		etc.		

La coïncidence entre la perturbation locale et brusque de la pression atmosphérique à 8^h et le début de la série de seiches est évidente. Nous avons un bassin d'eau ; à l'une des extrémités une hausse barométrique, très rapide, de 4^{mm} de mercure, amène une dénivellation locale négative ; à cette hausse barométrique succède une baisse aussi forte, de là, dénivellation locale positive ; de là, l'impulsion de la série des seiches. C'est très simple, au premier abord.

Mais les dimensions énormes des seiches ce jour-là sont-elles en rapport avec la variation barométrique ? Cela ne semble pas évident à première vue. La densité du mercure est 13.6 ; une variation de 4^{mm} de mercure donnerait donc sur un baromètre à eau une variation de hauteur de 54^{mm} ; elle causerait sur le lac une dénivellation de 54^{mm}. Si à la dénivellation de première impulsion que nous supposerons une dénivellation en décrue, succède une dénivellation inverse en crue, nous avons une hauteur de seiche du double, soit de 108^{mm}. Nous avons donc l'explication dans la matinée du 20 août, par le fait des variations du baromètre de 4^{mm} de mercure, de la production de seiches de 108^{mm}, disons de 11^{cm}. Nous avons donc la raison de seiches, mais non de seiches aussi énormes que celles qui ont été cons-

tatées par le limnographe. Les seiches de Genève du 20 août semblent six fois trop fortes pour être expliquées par les variations barométriques enregistrées ce jour-là.

Revenons à nos seiches du 20 août et nous y trouverons, je crois, l'explication de cette discordance apparente.

Tout d'abord les seiches de Genève qui ont atteint à 10^h la hauteur énorme de 62^{cm} étaient des seiches longitudinales. Mais ce n'était pas des seiches de type simple ; c'était des dicrotes. Il y avait interférence de deux mouvements, l'un uninodal, l'autre binodal. Il y avait donc à certains moments superposition de deux mouvements ; quand les seiches ont acquis la hauteur maximale de 62^{cm}, il y avait addition de deux seiches : une uninodale de 31^{cm} et une binodale de 31^{cm} peuvent produire en se superposant une seiche dicrote de 62^{cm}, ou à peu près.

Nous n'avons donc à expliquer que la production de seiches de 31^{cm}. Mais c'est encore trois fois plus que ce dont peut rendre compte une variation barométrique de 4^{mm} de mercure. Il y a encore discordance entre les causes et les effets. Cette discordance disparaît si nous donnons attention au fait que les seiches de 62^{cm} ont été mesurées à Genève ; que dans cette station il y a exagération de la hauteur des seiches par les conditions locales de la forme et du relief du bassin ; que le lac est rétréci à Genève en un long golfe de largeur progressivement décroissante ; que le Petit-lac est beaucoup moins profond que le Grand-lac. Il en résulte, comme nous l'avons vu p. 139 qu'il y a amplification locale de la hauteur des seiches ; que les mêmes seiches sont à Genève 4 fois plus hautes qu'à Chillon. Si nous voulons rechercher les causes de la marée, nous n'irons pas mesurer les dénivellations de l'Océan au fond de la baie de Fundy ou sur les côtes du Pas-de-Calais ; de même, pour rapporter les seiches du Léman aux variations barométriques qui les déterminent, nous ne mesurerons pas les seiches à Genève où elles ont une amplification locale extraordinaire. Les seiches du 20 août n'avaient à Chillon qu'une hauteur de 16^{cm} ; elles étaient composées d'uninodales et de binodales n'ayant chacune que 8^{cm} de hauteur. Des seiches de 8^{cm} de hauteur correspondent à une variation barométrique de 3^{mm} de mercure. La variation constatée par les barographes de Thonon et de Morges a dépassé 3^{mm}. Les énormes seiches de Genève de 62^{cm}, du 20 août 1890, trouvent ainsi leur explication suffisante.

Quant aux grandes seiches historiques, celles de Fatio de Duillier, de H.-B. de Saussure, de Veinié, avec leur hauteur dépassant 1.4^{m} et 1.9^{m} (voir pages 41 et suivantes), je veux croire qu'elles se ramèneraient probablement de la même manière, si nous avions plus de détails d'observation, à des dimensions en rapport avec les variations possibles de la pression atmosphérique. Elles ont toutes été mesurées à Genève, c'est-à-dire dans une station où le relief géographique du lac amplifie les dénivellations de quatre fois environ leur grandeur normale ; elles ont été mesurées dans le port ou dans le Rhône, en un point où, comme nous l'avons vu pour les seiches de la machine hydraulique, il y a des conditions locales de surexagération de la hauteur des dénivellations. Pour peu qu'il y ait eu en même temps dicrotisme des seiches, c'est-à-dire interférence de deux vagues qui se surajoutent dans leurs conjonctions favorables [1], il n'y a plus aucune difficulté dans la hauteur extraordinaire de ces seiches historiques. Ajoutons que ces grandes seiches ont eu lieu en temps d'orage. Les seiches de Fatio de Duillier (16 septembre 1600) ont coïncidé avec un orage : « Depuis le matin jusqu'à 11^{h}, après plusieurs grands tonnerres, le Rhône fit en 3 ou 4 reprises une espèce de flux et de reflux. » De même les seiches de H.-B. de Saussure (3 août 1763) ont été précédées « par un orage considérable qui avait fondu à 15 $^{1}/_{2}$^{h} sur la ville de Genève » ; les seiches ont été observées vers 17^{h}. De même les seiches de Bastard (5 juillet 1788) : « le temps fut orageux entre 6 et 7^{h} », et les seiches étaient énormes à 8 $^{1}/_{2}$^{h}. De même les seiches de Veinié (2 et 3 octobre 1841) : « la journée du 2 octobre s'est terminée par un orage violent » à la suite duquel les seiches extraordinaires ont commencé à apparaître. De même, pour toutes les seiches assez grandes, pour que l'on en ait conservé la mémoire.

Dans ces seiches historiques, nous n'avons pas d'observations barométriques assez détaillées pour que nous puissions suivre à une démonstration complète ; nous avons vu que le tracé d'un baromètre enregistreur est nécessaire pour dessiner les variations rapides qui donnent l'impulsion des seiches. Mais le calcul que nous venons de faire à propos des plus grandes seiches connues dans la période moderne, celles du 20 août 1890, suffit à prouver, semble-t-il, avec évidence, que nous avons dans les variations locales de la pression

[1] Cela semble probable pour les seiches de Saussure, de Veinié, pour autant qu'on peut en juger par la durée des oscillations.

atmosphérique en temps d'orage, une cause suffisante de la production des seiches observées.

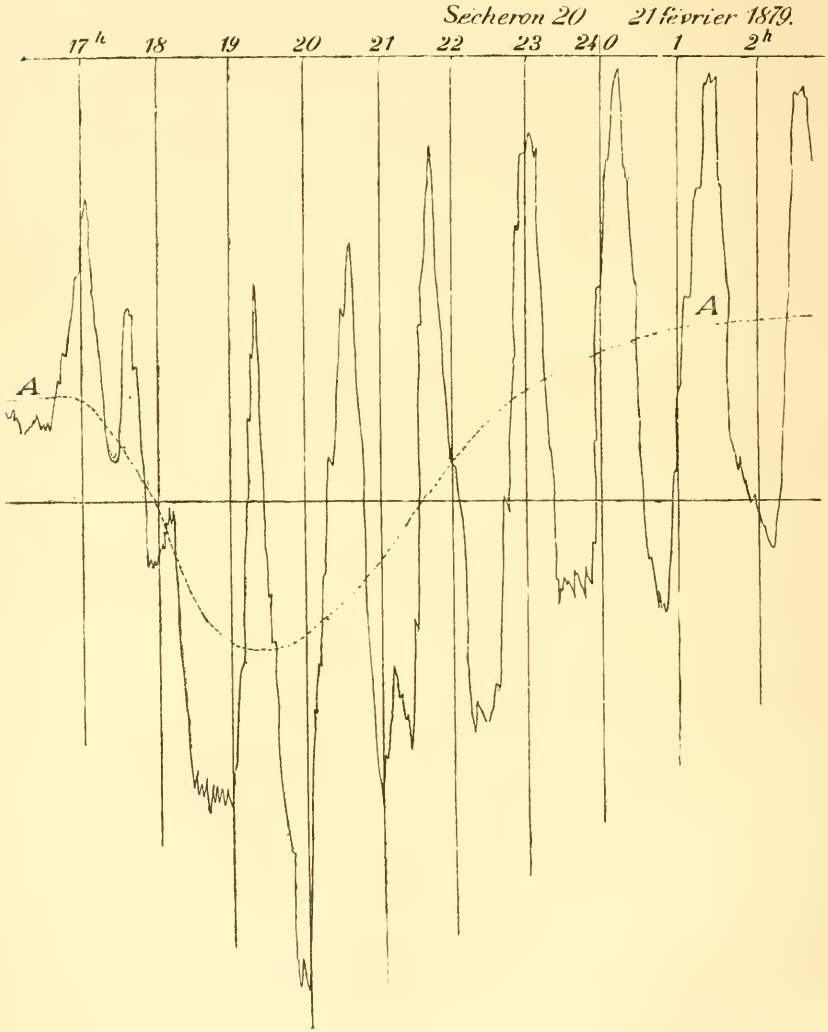
Les seiches et le vent.

Le second phénomène mécanique de la perturbation atmosphérique est le vent ; qu'il soit cause, qu'il soit effet de la perturbation, nous ne le discutons pas ici. Toujours est-il que le vent peut être l'origine de dénivellations et de dénivellations considérables de la nappe d'eau ; l'eau est déprimée dans la région sur le vent, elle est soulevée, accumulée dans la région sous le vent ; il y a dénivellation continue (voyez p. 29 sq.) Or si le coup de vent est subit, ou s'il cesse subitement, si la vitesse de l'apparition ou de la disparition du phénomène est en rapport avec le rythme du balancement de l'eau, il semblerait qu'il puisse y avoir mise en oscillation de la masse du lac, balancement de l'eau, production de seiches ; le même raisonnement que nous avons fait pour les seiches causées par les variations locales de la pression atmosphérique paraît ici valable. Un coup de vent subit peut mettre l'eau du lac en état de balancement, comme nous mettons en balancement l'eau d'une cuvette sur laquelle nous soufflons brusquement. Etant connus les deux types de vent, la seiche de première impulsion causée par un coup de vent subit doit être en décrue locale dans la région sur le vent où frappe un vent de refoulement, en crue locale dans la région sous le vent où commence un vent d'appel.

Mais, dira-t-on, il est inutile de distinguer l'action du vent de celle de la variation locale de pression atmosphérique ; ces deux actions doivent être les mêmes ou tout au moins se surajouter. Le vent étant refoulé loin du centre de pression forte, ou attiré vers le centre de pression faible, la dénivellation causée par le vent doit être de même direction que celle causée par la pression atmosphérique. Dans les deux fluides superposés, l'eau et l'air, l'effet doit être de même sens et de même direction. — A cela je répondrai que le vent n'a pas nécessairement une action de même sens que la variation de pression. Dans le cas de l'orage local avec des vents divergeant centrifugalement, oui, la direction est la même : pression atmosphérique plus forte sous le centre de l'orage et vent divergent amènent l'un et l'autre une décrue du lac sous la perturbation. Mais dans le cas du cyclone, ouragan-cyclone ou trombe, le vent n'est pas directement centripète ; il tourbillonne en spirales vers le centre, mais la direction des ondes aérien-

nes est plus rapprochée de la circonférence que du rayon ; le vent est presque tangent au cercle du tourbillon. L'action du vent dans ce cas n'est donc pas du tout la même que celle de la pression ; elles opèrent suivant des lignes presque perpendiculaires l'une à l'autre.

Nous avons de cette action du vent un exemple célèbre, publié en détails avec dessin de la courbe limnographique de Sécheron, et par-



(Fig. 80.) Trace limnographique de Sécheron pendant l'ouragan-cyclone du 20 février 1879. Dénivellation 1/2 grandeur naturelle. Vitesse 1cm par heure.

faitement étudié par M. Ph. Plantamour (1). L'ouragan-cyclone du 20 février 1879, dont nous avons raconté les principales péripéties (2) a causé à Genève de fortes seiches de 15 à 16cm de hauteur, (fig. 80) (3) dont la série a manifestement commencé au passage du tourbillon. Mais, chose notable, au moment où l'ouragan sévissait à Genève, à partir de 17 3/4h, le lac a présenté une dénivellation en décrue des mieux marquées; le niveau moyen du lac, tracé au juger entre les sommets des seiches hautes et des seiches basses, (courbe pointée A de la fig. 80) a montré pendant trois heures une décrue de 9cm environ au-dessous du niveau moyen de la journée, mesuré dans l'après-midi. Ainsi que M. Plantamour l'a fort bien indiqué, cette décrue locale à Genève, pendant laquelle une crue locale correspondante apparaissait à Morges, ne peut être due à la variation de pression atmosphérique. Le baromètre était d'abord en baisse rapide et intense, puis en hausse aussi rapide (4); le tourbillon se propageant du S.-W. au N.-E. a atteint le lac d'abord à Genève, puis ensuite à Nyon, Morges et Vevey; par conséquent la variation locale de la pression aurait dû d'abord occasionner sur le lac une crue locale à Genève, avec décrue à Morges, c'est-à-dire le contraire de ce qui a eu lieu. Avec M. Plantamour, j'admets, sans hésiter, que la forte décrue de Genève a été due au vent de tempête qui soufflait avec l'intensité décrite. Ce vent du sud-ouest, d'une violence exceptionnelle, a causé une dénivellation en sens inverse de celle qui était provoquée par la pression atmosphérique; la décrue à Genève due au vent a été plus forte que la crue due à la différence de pression entre Genève et Morges; la résultante a été une décrue locale à Genève, une crue locale à Morges.

Mais cette dénivellation a-t-elle été la cause de la série des seiches concomitantes? Est-ce à elle que nous devons attribuer la mise en balancement de l'eau dans la soirée du 20 février? Je ne le crois pas.

(1) Loc. cit. p. 63, N° 18.

(2) T. I., p. 335.

(3) Dans la fig. 80, j'ai reproduit le tracé de Sécheron en le réduisant à 1/2 grandeur pour la hauteur des dénivellations et en ralentissant la vitesse de l'enregistrement, de manière à mieux mettre en évidence les allures du phénomène.

(4) A Genève le baromètre réduit à zéro a passé par les états suivants:

20 février	12h	714.48mm	
	17	706.77	
	21 1/2	714.09	(observations de M. Ph. Plantamour).

Deux arguments me paraissent s'y opposer. Le premier, c'est que la dénivellation a duré beaucoup plus longtemps, trois heures environ, que le temps d'oscillation d'une seiche, 1 $^1/_4{}^h$; les allures de la dénivellation observée ne correspondent pas avec le rythme des seiches. Le second argument, c'est que la grandeur des seiches n'a pas été en rapport avec l'intensité du vent. Cette perturbation atmosphérique, la plus terrible de celles qui, de mémoire d'homme, ont frappé le Léman, a développé des seiches dont la hauteur n'a rien eu d'exceptionnel ; les seiches du 20 février 1879 n'ont eu à Genève que 16^{cm} de hauteur maximale, tandis que celles du 20 août 1890 avaient jusqu'à 62^{cm} dans la même station. Nous devons conclure de ce rapprochement que, si les seiches peuvent être causées par le vent, c'est une cause beaucoup moins puissante et efficace que les causes ordinaires de la mise en balancement de l'eau du lac ; puisque le plus grand vent connu n'a été accompagné que de seiches de hauteur médiocre, le vent n'est pas probablement une cause bien active de production des seiches.

Je serais disposé à admettre que, le 20 février 1879, le vent du sud-ouest de l'ouragan-cyclone a été la cause de la dénivellation générale qui, pendant quelques heures, a déprimé l'eau à Genève pour la faire monter dans le Grand-lac (à Morges en particulier) ; que la série de seiches, qui a commencé en même temps, a été due aux variations locales de la pression atmosphérique qui ont accompagné le passage de l'ouragan.

Je me suis arrêté un peu longuement sur cet exemple, parce qu'il est le type d'un phénomène assez fréquent ; la dénivellation continue, qui a été si bien marquée le 20 février 1879, apparaît assez souvent à Genève au début de fortes séries de seiches, au moment où frappent les grands coups de vent sudois.

Nous arrivons ainsi à attribuer peu d'action utile pour la production des seiches aux vents horizontaux, comme celui du 20 février 1879. Tirerons-nous la même conclusion au sujet du vent vertical descendant que nous avons vu caractériser l'orage local [1] ? Nous en avons garde ; nous lui assignons une grande puissance pour le développement des seiches. Au moment de l'éclat de l'orage, il y a absorption subite de chaleur, refroidissement de l'air, chute de l'air qui tombe en

[1] T. I, p. 330.

masse sur le sol, vent vertical descendant ; frappant comme un coup de tampon perpendiculairement sur la nappe du lac, ce vent doit causer une décrue locale subite, cause initiale de l'oscillation des seiches ; c'est à lui que nous sommes appelés à rapporter l'origine des seiches en temps d'orage local. Mais comme ce courant d'air descendant est probablement la cause de la variation locale de la pression atmosphérique, comme les deux actions se confondent, nous ne croyons pas devoir les séparer; nous laisserons à d'autres le soin de disserter sur le mécanisme de l'orage local, et de faire la part entre pression statique de l'atmosphère et action dynamique du vent plongeant.

Arrêtons-nous un peu pour condenser notre raisonnement. Nous avons vu que les plus grandes seiches coïncident généralement avec un orage ; que cependant il y a parfois développement de seiches importantes en l'absence de toute manifestation électrique visible ; nous venons de voir que les variations subites et locales de la pression atmosphérique constatées par les baromètres enregistreurs suffisent à expliquer les plus fortes seiches dessinées par les limnographes. Des différents facteurs qui composent l'orage, c'est donc aux phénomènes mécaniques, caractérisés essentiellement par la variation de pression atmosphérique que nous attribuons la cause des seiches et nous n'avons plus besoin de songer aux phénomènes mystérieux et mal explicables de l'attraction électrique. Si cela est, il est facile de comprendre la plus grande hauteur des seiches quand le baromètre est bas, ainsi que nous l'a révélé notre statistique générale ; l'air est ordinairement plus agité, les variations de pression sont plus fréquentes et plus fortes quand le baromètre est bas que quand il est élevé.

Il est encore un point que nous avons à expliquer, avant de tirer notre conclusion : c'est le fait indiqué par M. Russell au sujet des seiches du lac George. Ce fait, dont nous avons de nombreux exemples, peut se résumer en ces termes : Dans une série de seiches, ce n'est pas toujours la première qui est la plus grande ; les premières oscillations sont parfois relativement faibles, et sans qu'il apparaisse de nouvelle impulsion, ce n'est qu'au bout de quelques balancements que l'on observe la hauteur maximale de la série. Nous en avons vu un cas dans la grande série des seiches du 26 mars 1891 (p. 110). Nous venons d'en trouver un bel exemple dans la série des énormes seiches du 20

août 1890 (p. 190). M. Russell suppose, pour expliquer ce développement progressif de la hauteur des oscillations, qu'il y aurait des impulsions successives qui augmenteraient, par leur action concordante, l'amplitude des balancements du pendule. L'exemple du 20 août 1890 nous donne une explication plus simple. Quand il y a dicrotisme, comme ce jour-là, superposition de seiches des deux types, uninodales et binodales, le maximum de hauteur de la résultante est atteint lorsqu'il y a conjonction entre les extrêmes de hauteur des deux types, simultanéité entre les seiches hautes ou les seiches basses de chacune des deux séries de seiches composantes. Or cette conjonction ne tombe pas nécessairement sur la première seiche de la série ; elle peut ne survenir qu'au bout de quelques oscillations, et alors on constate une amplitude progressive de la hauteur des dénivellations jusqu'à ce que la conjonction soit effectuée. Je ne crois donc pas nécessaire pour ce type de séries de seiches de faire intervenir une cause compliquée, difficile à comprendre, comme celle que M. Russell propose.

En résumé, nous trouvons dans les variations locales et rapides de la pression atmosphérique une cause suffisante qui explique les plus grandes seiches connues. *Qui peut le plus peut le moins ;* les seiches de plus faible hauteur, les seiches ordinaires, celles qui s'observent en tout temps, ne soulèveront point de difficultés ; il y a toujours et constamment des mouvements atmosphériques qui échappent à l'enregistrement des barographes actuels, mais qui sont certainement capables de rendre compte des mouvements légers de la nappe inconstante des eaux. Le lac est un vaste baromètre à eau qui réagit avec une sensibilité exquise aux moindres perturbations de l'atmosphère sus-jacente ; un tracé limnographique est le document le plus complet et le plus sûr qui inscrit l'histoire des variations barométriques de la région.

Pourquoi, dans certains cas, avons-nous des seiches uninodales, pourquoi des seiches binodales ou plurinodales ? La réponse à cette question me paraît devoir être cherchée dans deux directions différentes :

Ou bien, dans la vitesse de l'action perturbatrice, dont les allures correspondraient au rythme de vagues d'oscillation fixe uninodales, binodales ou plurinodales. Quand dans mes auges d'expérimentation je frappais l'eau avec un rythme deux fois plus rapide, j'obtenais des vagues binodales au lieu des uninodales.

Ou bien, dans le lieu où l'action perturbatrice déploie son effet. Un coup porté à l'extrémité de l'auge détermine des vagues uninodales, un coup porté sur le milieu du bassin produit des binodales ; le milieu de la longueur du bassin est, l'on s'en souvient, le ventre médian des binodales.

Il est difficile d'apporter des faits d'observation à l'appui de l'une ou de l'autre de ces hypothèses. Cependant la fréquence des seiches dicrotes, où il y a simultanément des uninodales et des binodales, me ferait pencher pour la seconde. En effet, une perturbation traversant le Léman dans le voisinage de Genève causerait des uninodales, une autre perturbation passant de Rolle à Thonon causerait des binodales. Peut-être aussi la même perturbation suivant le lac dans sa longueur, agissant d'abord sur Genève, puis sur le profil Thonon-Rolle, produirait-elle le même effet, si ses allures sont convenablement réglées, et donnerait-elle naissance à des seiches dicrotes.

Quelque riche que soit notre matériel d'observation, la question me semble dépasser les moyens de contrôle dont nous disposons actuellement.

Avant de terminer cette étude des causes des seiches cherchées dans les perturbations de l'atmosphère, indiquons encore deux actions qui peuvent occasionner une mise en balancement de l'eau des lacs.

Dans certains lacs favorablement situés, l'*avalanche de neige* peut être parfois la cause de seiches puissantes. Quiconque a vu, dans les montagnes, des forêts entières renversées par « le vent de l'avalanche, » admettra la puissance de cette effrayante perturbation locale de l'atmosphère. Je n'ai pas d'exemples à citer de seiches produites par cette cause.

Je ne parle que pour mémoire de la production des seiches par l'*éboulement d'une montagne* ; c'est un phénomène tellement rare qu'il ne peut être compté comme cause normale des seiches, mais il est incontestable qu'il est au nombre des causes possibles. L'éboulement de la montagne peut être la cause de mouvements du lac de deux manières, ou bien par la chute même de la montagne dans le lac, ou bien par l'ébranlement de l'air, par le coup de vent, analogue au vent de l'avalanche, causé par un éboulement dans le voisinage du lac.

La description suivante d'un épisode de l'éboulement du Rossberg,

le 2 septembre 1806, est une preuve directe de la réalité de cette action. « Les débris du rocher se portèrent jusqu'au lac de Lowerz et ils en comblèrent l'extrémité occidentale. Les effets de cette chute sur le lac furent prodigieux ; les eaux s'élevèrent avec un mouvement semblable à celui qu'excite la tempête jusqu'à la hauteur de 60 à 70 pieds du côté de Seewen, village situé à l'autre extrémité du lac (1). » La relation officielle de la catastrophe évalue à 150 pieds la hauteur de la vague qui, après avoir traversé le lac de Lowerz, alla battre la côte de Seewen (2). « La petite île du lac a été entièrement couverte par les flots, et la grande île jusqu'à la hauteur du clocher de l'ermitage. On trouva dans le village de Steinen (3) des poissons vivants qui y avaient été jetés par les vagues. (4)

M. E. de Vallière attribue à une vague de ce genre les ravages causés sur les bords du lac Léman, et jusqu'à Genève, par l'éboulement du Tauretunum, en Valais, en l'an 563 (5). Nous en reparlerons à un autre chapitre.

Qu'une première vague de cette nature soit suivie dans un bassin fermé d'oscillations successives, de vagues de balancement, de seiches, cela n'a pas besoin d'autre démonstration.

La cause des seiches cherchée dans les tremblements de terre.

Les secousses portées sur un vase peuvent, dans certaines circonstances, provoquer un mouvement de balancement de l'eau contenue dans ce vase. Le fait est incontestable, et la plus vulgaire expérience le démontre. Que le mouvement du balancement de l'eau puisse résulter d'une secousse apportée au vase, c'est ce que nous voyons tous les jours dans un verre d'eau ou dans une cuvette. Que toute secousse

(1) *Lutz*, Dictionnaire historique de la Suisse, 1811.

(2) Relation officielle de la destruction de la vallée d'Arth, p. 5.

(3) A 33 mètres au-dessus du lac, d'après la carte fédérale.

(4) Relation succincte de l'écroulement de la montagne au-dessus de Goldau. Zurich, 1806, p. 5.

(5) *E. de Vallière*. Quelques mots sur la chute de Tauretunum. Bull. Soc. Vaud Sc. nat., XIV, 437.

portée sur le vase ne mette pas nécessairement l'eau en balancement, c'est ce qu'on peut vérifier en imprimant à un bassin plein d'eau un mouvement ou trop lent, ou trop brusque, ou un mouvement d'ensemble dans le sens vertical, soit en montant, soit en descendant, ou une secousse trop faible qui n'entraîne pas l'eau dans un mouvement appréciable.

Il en est de même des secousses plus considérables qui ébranlent la terre elle même, des tremblements de terre qui mettent en mouvement tout le pays et, par conséquent, les parois des bassins dans lesquels reposent les lacs et les mers. Ces secousses se propagent parfois à l'eau elle-même ; d'autres fois elles la laissent immobile.

Y a-t-il réellement des rapports entre les seiches et les tremblements de terre ?

Interrogeons à ce sujet l'expérience et l'observation.

L'eau est parfois mise en mouvement par les tremblements de terre. C'est ce qui résulte de l'histoire trop souvent lugubre des raz-de-mer ou raz-de-marée d'origine sismique.

Prenons d'abord nos exemples dans l'Océan. Je copie une page de Reclus. (1) « Lorsque de violentes secousses agitent le sol, les villes situées sur le bord de la mer ont eu souvent beaucoup plus à souffrir de la soudaine irruption des eaux que de l'agitation de la terre elle-même ; que les vagues aient reçu le choc des côtes voisines, ou bien que le centre d'ébranlement se trouve au fond même de l'Océan, les masses d'eau se redressent à une hauteur formidable et se ruent sur les rivages comme pendant les ouragans. En 1763, à l'heure où la secousse des Calabres renversait les villes et les villages sur le continent, un terrible raz-de-marée, après avoir balayé deux mille personnes réunies sur la plage de Scylla, s'engouffra dans le port de Messine, y coula tous les navires et démolit en partie la rangée de palais qui bordait le rivage ; plus de douze mille individus périrent, dit-on, sous les ruines. Le 7 juin 1692, lors du tremblement qui agita la Jamaïque et les mers voisines, les vagues se précipitèrent à l'assaut de la ville de Port-Royal et, dans l'espace de trente minutes, recouvrirent plus de deux mille cinq cents maisons d'une couche de dix mètres d'eau ; les navires furent jetés çà et là dans les campagnes, et la frégate *Swan* vint

(1) *E. Reclus*, La Terre, I, 684. Paris, 1874.

échouer sur un fort. De même, d'après le témoignage d'Acosta, la terrible vague qui démolit Callao, en l'année 1586, et qui lança un grand navire sur la route de Lima, à 16 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer, aurait eu la hauteur totale de 27 mètres. » « Dans le grand tremblement de terre de Lisbonne (1er novembre 1755), un mur d'eau de 17 mètres de haut se dressa à l'embouchure du Tage, remplit l'estuaire, dépassa les quais de la ville et se rua dans les maisons. » Citons encore la destruction récente d'Arica, au Pérou, 13 août 1868 et celle d'Iquique, sur la côte du Pacifique aussi, le 9 mai 1877.

Citons encore l'exemple donné par Arago (1) pour justifier son opinion que les seiches peuvent être causées par des tremblements de terre. Après avoir rappelé le raz-de-mer du tremblement de terre de Lisbonne, il ajoute : « Le tremblement de terre, beaucoup moins fort, du 31 mars 1761, donna aussi lieu à une semblable agitation de vagues à Lisbonne, à Madère, à Cork, à Mount's Bay (Cornouailles), à Bristol, à Amsterdam et même à la Barbade. A Mount's Bay, la mer s'éleva de deux mètres et reprit son niveau cinq fois de suite, dans le court espace d'une heure. »

Voyez encore le chapitre intitulé *Les mouvements de la mer,* dans l'ouvrage de Fuchs sur les volcans. (2)

Ce n'est pas seulement la mer qui est agitée par les tremblements de terre. Les bassins fermés des lacs ne sont pas à l'abri de ces mouvements.

Dans une énumération des tremblements de terre connus en Suisse, avant l'an 1756 (3), je trouve les faits suivants :

Le 1er mars 1584, tremblement de terre dans toute la Suisse et les pays voisins. « Le lac Léman, agité sans vent, s'élance dans les terres plus de vingt pas. »

« Le 16 septembre 1600, le cours du Rhône, près de Genève, fut suspendu par un tremblement de terre. Le terrain, dans l'endroit d'où le Rhône sort du lac, fut soulevé ; ce soulèvement et l'abaissement qui

(1) *F. Arago*, [loc. cit. p. 169] p. 580.

(2) *K. Fuchs*, Les volcans et les tremblements de terre, p. 129 sq. Paris 1876.

(3) *E. Bertrand*, Mémoires historiques et physiques sur les tremblements de terre. La Haye, 1757, p. 48 sq.

succéda donnèrent lieu à un flux et à un reflux. » Ce sont les célèbres seiches de 5 pieds de haut, décrites par Fatio de Duillier. (1)

Le 8 septembre 1601, tremblement de terre dans toute la Suisse et les pays voisins. « Le lac Léman fut ému. » A Lucerne, le cours de la Reuss fut interrompu, en sorte qu'une partie tombait dans le lac et l'autre partie rebroussa, et qu'on aurait pu passer à sec dans le lit pendant un instant.

Le 1er septembre 1666. Tremblement de terre, à Arbon, au lac de Constance : « Les eaux du lac s'avancèrent sur le rivage de plus de 25 à 30 pieds et se retirèrent subitement. »

Le 13 janvier 1729. Tremblement de terre dans le canton de Berne. « Sur le lac de Thoune, des bateaux furent poussés avec violence sur les bords. »

Le 1er novembre 1755, le tremblement de terre dit de Lisbonne fut ressenti en Suisse. « Le lac Léman eut, environ les dix heures du matin, du côté de Vevey, la Tour, Chillon, Villeneuve, un mouvement sensible. Trois fois, ses eaux montèrent brusquement et se retirèrent de même. Une barque partie de Vevey, allant à pleines voiles, recula tout à coup. On n'a rien aperçu du côté de Morges ni de Genève.

« Des pêcheurs qui étaient sur le lac de Nidau sentirent leur petit bateau emporté et ramené par une sorte de courant, et soulevé ensuite par des flots alternatifs, quoiqu'ils n'aperçussent aucun vent extérieur.

« Les lacs de Brienz et de Thoune, surtout le premier, s'avancèrent successivement sur le rivage et s'en éloignèrent ensuite ; le cours de l'Aar, sortant du premier pour entrer dans le dernier, parut un instant retardé. »

Dans le petit lac de Seedorf, « l'eau haussa tout à coup et baissa ensuite, se remettant comme auparavant. »

« Le lac de Zurich, surtout le lac supérieur, au-dessus de Rapperswyl, fut agité et soulevé sans aucun vent extérieur. Il haussa différemment de 6, de 10, jusqu'à 12 pieds. Les phénomènes durèrent 6 à

(1) Au sujet de cette observation, je dois faire une réserve. Le tremblement de terre indiqué par Spon dans son *Histoire de Genève*, I, 417, et admis par Bertrand, n'a été confirmé par aucun autre auteur et n'est basé que sur l'existence des seiches. J'estime plus probable que les seiches ont, comme je l'ai dit plus haut, été causées par l'orage qui a éclaté au moment même du commencement des oscillations de l'eau (voyez p. 192).

7 minutes. A Mänedorf, à Meilen, à Ruschikon, à Horgen, ce même lac y a été jeté, à plusieurs fois, loin de ses bords.

« Le lac de Constance, près de la ville de Stein, parut aussi s'élever de plusieurs pieds, et le Rhin, qui en sort près de ce lieu, s'accrut pour quelques instants.

« Le lac de Wahlstat (Walenstadt), dans le comté de Sargans, fut aussi élevé pour quelques moments ; le lac parut agité du sud au nord.

« Les lacs de la Suisse n'ont pas été les seuls à se ressentir de l'émotion des eaux intérieures par le tremblement de terre du 1er novembre 1755. Près de Salzungen en Thuringe, est un petit lac ; son eau se perdit entièrement par une ouverture qui lui apporte ordinairement ses eaux. Quelques moments après, elle revint avec impétuosité, elle se perdit de nouveau et reparut alternativement à plusieurs reprises, la violence diminuant chaque fois. On a observé les mêmes agitations dans les eaux de plusieurs lacs des environs de Berlin, aussi bien que dans celles de divers lacs dans les pays du nord. »

Je trouve ailleurs que, lors du tremblement du 1er novembre 1755, les lacs de Templin, Netzo, Mahlgau, Roddelin, Lobbe dans le Brandebourg, le lac de Malchow dans le Mecklembourg et le lac de Stechlin, à l'ouest de Furstemberg, montrèrent des mouvements inaccoutumés. (1)

Nous venons de voir que l'eau des mers et des lacs peut entrer en mouvement ; que son niveau s'élève et s'abaisse subitement au moment du tremblement de terre ; que, pour employer une terminologie plus précise, il y a dénivellation locale, brusque et subite. Il y a plus : des observations très authentiques montrent que, sous l'action du tremblement de terre, l'eau peut entrer en état d'oscillation ; que la vague la transmet sous la forme d'une ondulation, à travers l'Océan. Je n'ai qu'à rappeler, pour démontrer ce dire, les vagues du tremblement de terre d'Arica (août 1868), qui ont traversé le Pacifique et sont venues battre les côtes de la Nouvelle-Zélande et de l'Australie, à 110 degrés de distance du Pérou. (2)

Je citerai encore la vague de transmission du tremblement de terre du 9 mai 1877 qui, partie d'Iquique, au Pérou, est allée ravager les îles Sandwich (3). Je citerai la phrase suivante d'un rapport de M. Russell,

(1) *Klöden*, Beiträge zur meteorologischen Kentniss der Mark Brandenburg, 1837.

(2) *Figuier*, Année scientifique, XIV, 353, Paris, 1870.

(3) Nature, XVI, 112, 132, 174, 567. London, 1877.

de l'observatoire de Sydney : « Les plus petits chocs de tremblement de terre ressentis en Nouvelle-Zélande sont presque toujours figurés automatiquement sur les tracés des marégraphes enregistreurs de Sydney et de Newcastle [1]. Je citerai, enfin, la vague de Krakatoa qui, après avoir ravagé les côtes du détroit de la Sonde, a parcouru le Pacifique, l'Océan Indien, et même l'Atlantique. [2]

Les mêmes mouvements d'oscillation sous l'influence de la secousse du tremblement de terre ont aussi, parfois, été observés dans les lacs. Je renvoie à la description que j'ai citée, d'après Bertrand, du tremblement de terre du 1er novembre 1755, et de ses effets sur le lac Léman, à Vevey, sur le lac de Bienne, à Nidau, sur le lac de Zurich et sur le lac de Salzungen.

Puisque l'eau peut être mise en mouvement subit par le choc du tremblement de terre, puisque ce mouvement peut se propager à distance sous la forme d'une vague de transmission, nous avons là, semble-t-il, toutes les conditions voulues pour la production de véritables seiches dans des bassins fermés. Et, en fait, il me semble, en relisant les diverses observations que je viens de citer, y découvrir quelque chose de tout à fait analogue à nos seiches. La description en est confuse, cela est vrai, mais elle n'est pas plus confuse que ne l'était l'observation des seiches avant la construction des limnimètres enregistreurs.

La théorie nous montre donc, comme possible et probable, la production de seiches par les tremblements de terre, et l'expérience du passé semble confirmer cette idée.

Mais l'observation directe, si elle n'a pu infirmer cette conclusion, n'en a pas encore confirmé la justesse. Je suis arrivé à ce résultat négatif de deux manières :

1° En recherchant si les grandes seiches historiques du Léman, celles qui ont étonné les riverains par leur grandeur, ont coïncidé avec des secousses de tremblements de terre connus. Le résultat a été abso-

[1] Journal astr. soc. N. S. W. 1876, p. 37, cité dans Nature, XVI, 567. London, 1877.

[2] The eruption of Krakatoa. Report to the R. Society of London, part III, p. 89. London, 1888.

lument négatif [1]. Les plus fortes seiches n'ont pas été causées par des tremblements de terre.

2° En recherchant si les tremblements de terre actuels se traduisent par des seiches sur les tracés limnographiques. Depuis le 20 mars 1876 que mon limnographe de Morges a commencé à enregistrer les oscillations du Léman jusqu'à nos jours, décembre 1892, le nombre des tremblements de terre sentis dans la vallée du Léman a été grand. Je ne les énumère pas ici [2], mais j'en donne le résumé par années, en indiquant soit le nombre des tremblements de terre, soit celui des secousses. [3]

	Tremblements de terre.	Secousses.
1876	2	2
1877	2	2
1878	3	3
1879	2	5
1880	6	7
1881	14	43
1882	10	15
1883	2	2
1884	4	8
1885	6	9
1886	3	3
1887	10	18
1888	1	1
1889	0	0
1890	2	2
1891	2	3
1892	0	0
	69	123

(1) Voyez pour cette énumération mon étude sur la Cause des seiches [loc. cit. p. 63, n° 11], p. 223.

(2) Voir les rapports de la Commission sismologique suisse.

(3) Nous distinguons, en sismologie, le tremblement de terre de la secousse. Le tremblement de terre est le phénomène complexe, composé souvent d'un grand nombre de secousses qui se répètent avec une intensité et une extension variable pendant des heures, des journées, des mois même, à partir d'un centre sismique toujours le même ; que la cause en soit volcanique ou orogénique, la

Depuis 1876, époque où ont commencé nos observations limnographiques du lac Léman, jusqu'à la fin de 1892, nous avons donc connu plus de 120 secousses sismiques qui ont ébranlé tout ou partie du bassin de notre lac. Elles ont été les unes fortes les autres légères, les unes rapides les autres prolongées, les unes locales les autres générales, les unes indigènes les autres exogènes ; dans cette longue série, il semble que toutes les formes possibles de la secousse sismique aient été représentées. Et cependant pas une de ces secousses ne s'est inscrite sur les tracés de nos limnographes, pourtant très sensibles, par des oscillations de seiches que nous puissions attribuer au tremblement de terre. Non, pas même par un crochet subit qui indique la plus petite dénivellation de l'eau, fût-elle ou non suivie d'oscillations rythmiques. Quelle que soit la délicatesse de nos limnographes, ils sont absolument inhabiles à devenir des sismographes.

Comment expliquer ces faits, en apparence contradictoires : d'une part, les énormes raz-de-mer causés par certains tremblements de terre ; d'une autre part, l'absence absolue d'effets sur des appareils très sensibles qui enregistraient les dénivellations de l'eau, pendant des secousses assez fortes pour tirer de leur sommeil tous les habitants d'une ville endormie ?

J'explique ces faits en disant que, dans les lacs comme dans l'expérience à petite échelle d'une cuvette, tous les chocs ne se communiquent pas nécessairement à l'eau ; il faut, pour qu'il y ait raz-de-mer ou seiche, non-seulement une secousse de la terre, mais encore que cette secousse ait lieu dans des conditions déterminées d'intensité, de direction et de rythme.

Telle était la conclusion à laquelle j'étais arrivé dans une lettre adressée à des journaux scientifiques [1] ; j'interrogeais les naturalistes habitant les pays plus fréquemment visités que le nôtre par les tremblements de terre, et je leur demandais si, d'après leurs observations, il n'y a pas, au point de vue des raz-de-marée, des différences

cause des diverses secousses d'un même tremblement de terre est localisée en un même point de l'écorce du globe. La secousse est l'ébranlement spécial dû à une seule impulsion qui se propage centrifugalement autour du centre sismique. Chaque secousse est composée elle-même d'un nombre plus ou moins grand d'oscillations qui font vaciller le sol.

[1] *F.-A. Forel*, Seiches and earthquakes. Nature, XVII, 281. London, 7 febr. 1877. — Seiches et tremblements de terre. La Nature, VI, I, 239. Paris, 9 mars 1878.

d'un tremblement de terre à l'autre, — si toute secousse de même intensité est accompagnée nécessairement de mouvements de l'eau de même amplitude, — si, à côté des secousses ayant produit les raz-de-mer dont l'histoire a gardé le souvenir, il n'en a pas existé d'autres, de même force, qui n'ont pas agité ou n'ont que peu ébranlé la mer ?

Cette lettre a obtenu plusieurs réponses très intéressantes, entre autres de M. M.-E. de Rossi, de Rome, de M. Tardy, de Bourg-en-Bresse, de M. Chaplin, de Tokio, au Japon. En raison de son importance, je reproduis ici intégralement la lettre de M. de Rossi [1]. « J'ai vu avec plaisir, à propos des seiches du lac de Genève, dans votre livraison du 9 mars, une lettre de M. le docteur Forel, dans laquelle il est question de l'influence des tremblements de terre sur les seiches des lacs. M. Forel constate le fait que souvent, pendant des secousses très sensibles, les lacs ne donnent pas des vagues ou des seiches, tandis que, d'autres fois, les lacs prennent de très grands mouvements sous l'influence des tremblements de terre.

» Je dois faire observer que, dans ce phénomène des tremblements de terre, comme dans les seiches, les lacs se comportent tout à fait suivant les lois du pendule. Nous avons parfaitement constaté dans nos dernières études, en Italie, qu'il peut bien survenir un tremblement de terre sensible, sans que le sismographe à pendule donne aucune trace de mouvement. En revanche, il arrive très souvent de voir un pendule entrer en grande oscillation sans que la secousse soit ressentie par personne. Il m'a été possible d'avertir moi-même de l'existence d'un tremblement de terre très sensible, signalé en même temps par beaucoup de personnes, et d'avoir sur le champ observé au microscope huit pendules de différentes longueurs, sans avoir pu y remarquer un mouvement d'aucune sorte. Evidemment, ce fait dépend de la relation entre la longueur du pendule et la célérité des vibrations terrestres. Lorsque l'onde sismique est synchrone à l'oscillation naturelle du pendule, celui-ci prend un grand mouvement. Mais, lorsqu'elle est dissynchrone, le pendule se refuse plus ou moins à suivre le mouvement de la terre. Cela arrive de la même manière dans les roches de la croûte terrestre, et surtout dans les plus mobiles d'entre elles, c'est-à-dire dans les lacs. »

La science moderne a fait des pas considérables dans la connais-

[1] La Nature, VI, I, 282. Paris. 30 mars 1878.

sance des tremblements de terre, grâce aux excellents sismographes des Anglo-Japonais, et spécialement grâce au sismographe d'Ewing qui nous a révélé les caractères de la secousse sismique. Ces appareils, en nous montrant graphiquement ce que sont la secousse et les oscillations qui la composent, nous permettent de mieux juger les rapports éventuels du phénomène avec les seiches. Voici le résumé de l'expérience qu'ont acquise les physiciens de l'extrême orient de l'Asie, par leurs travaux dans une terre bénie pour l'étude des mouvements du sol. (1)

a) Une secousse sismique consiste en une série d'oscillations d'amplitude d'abord progressive, puis décroissante.

b) Généralement les oscillations commencent par être très faibles et n'atteignent leur amplitude maximale qu'après quelques secondes de temps.

c) La durée des oscillations, leur grandeur, leur direction varient considérablement dans la série d'une même secousse.

d) La durée de la série d'oscillations qui constitue la secousse est rarement inférieure à une minute ; elle est fréquemment de plusieurs minutes.

e) Même dans les forts tremblements de terre, le déplacement du sol dépasse rarement quelques millimètres ; quand la secousse est faible, l'oscillation n'atteint pas un millimètre d'amplitude.

f) La durée moyenne des oscillations du sol est $^1/_2$ seconde environ ; on a vu des secousses dans lesquelles il y avait 5 oscillations et même plus par seconde.

g) Le mouvement dans le plan vertical est ordinairement plus faible que dans les plans horizontaux.

La durée de l'oscillation du sol est donc remarquablement courte dans la généralité des cas. Exceptionnellement, on a vu une durée plus longue. C'est ainsi que le 18 avril 1889, l'observatoire sismologique de Tokio a enregistré une secousse, dont les oscillations extraordinairement lentes avaient une durée de 4 à 7 secondes chacune ; faibles au début, elles ont atteint une amplitude horizontale de 17^{mm}. Une aussi grande paresse des oscillations, jointe à un aussi fort déplacement du sol, n'avait jusqu'alors jamais été enregistrée par un sismographe. Pendant ce temps, le professeur West, du Collège des ingé-

(1) *J.-A. Ewing.* Earthquake measurement. Tokio, 1883.

nieurs, a vu l'eau d'un petit étang entrer en oscillation de balancement, montrer de véritables seiches dont l'amplitude a atteint jusqu'à 10^{cm} ; ces seiches ont été visibles pendant un quart d'heure environ (1).

Jusqu'à nouvel avis, nous avons donc pour les extrêmes de durée de l'oscillation du sol pendant les secousses sismiques 0.2 à 7^{sec}. Or, si nous nous reportons à ce que nous avons vu plus haut, c'est là une vitesse d'un tout autre ordre que celle des seiches uninodales ou binodales des grands lacs ; cela représente une impulsion beaucoup plus rapide que celle qui pourrait mettre l'eau des lacs en mouvement de balancement. Par conséquent, la secousse du tremblement de terre ne doit pas être cause des seiches proprement dites des grands lacs.

Ce n'est pas à dire cependant qu'elle n'en puisse produire dans de petits bassins. A l'exemple des seiches de l'étang du professeur West dans le tremblement de terre de Tokio du 18 avril 1889, je puis ajouter une observation analogue que m'a racontée mon ami, feu L. Guex, pasteur à Apples. Il était, avec sa famille, dans une villa près de Genève, lorsque la secousse du tremblement de terre de Viège, le 25 juillet 1855, les surprit ; ils sortirent dans le jardin et trouvèrent l'eau du bassin circulaire d'un jet-d'eau en oscillation de balancement ; elle se déversait par-dessus les bords du bassin, alternativement de chaque côté d'un même diamètre, et montrait dans ce lac en miniature de véritables seiches uninodales. Ces faits, et le cas plus fréquent de mise en balancement de l'eau d'une cuvette pendant une secousse de tremblement de terre (2), montrent que l'oscillation sismique du sol peut déterminer des vagues d'oscillation fixe dans l'eau, mais seulement lorsque le rythme de ces seiches est isochrone (ou à peu près) avec celui de l'oscillation. Cela ne peut avoir lieu que dans de très petits bassins.

Il y aurait encore une autre possibilité de seiches causées par la secousse sismique ; ce serait la production de seiches plurinodales dont le rythme serait assez rapide pour coïncider avec celui de l'oscillation sismique. C'est ce qui a peut-être lieu dans les tremblements de terre marins, dans ces vagues de transmission qui traversent l'Océan à la suite d'une secousse de tremblement de terre (v. p. 204) ou d'un

(1) Nature XL, 162. London 1889.

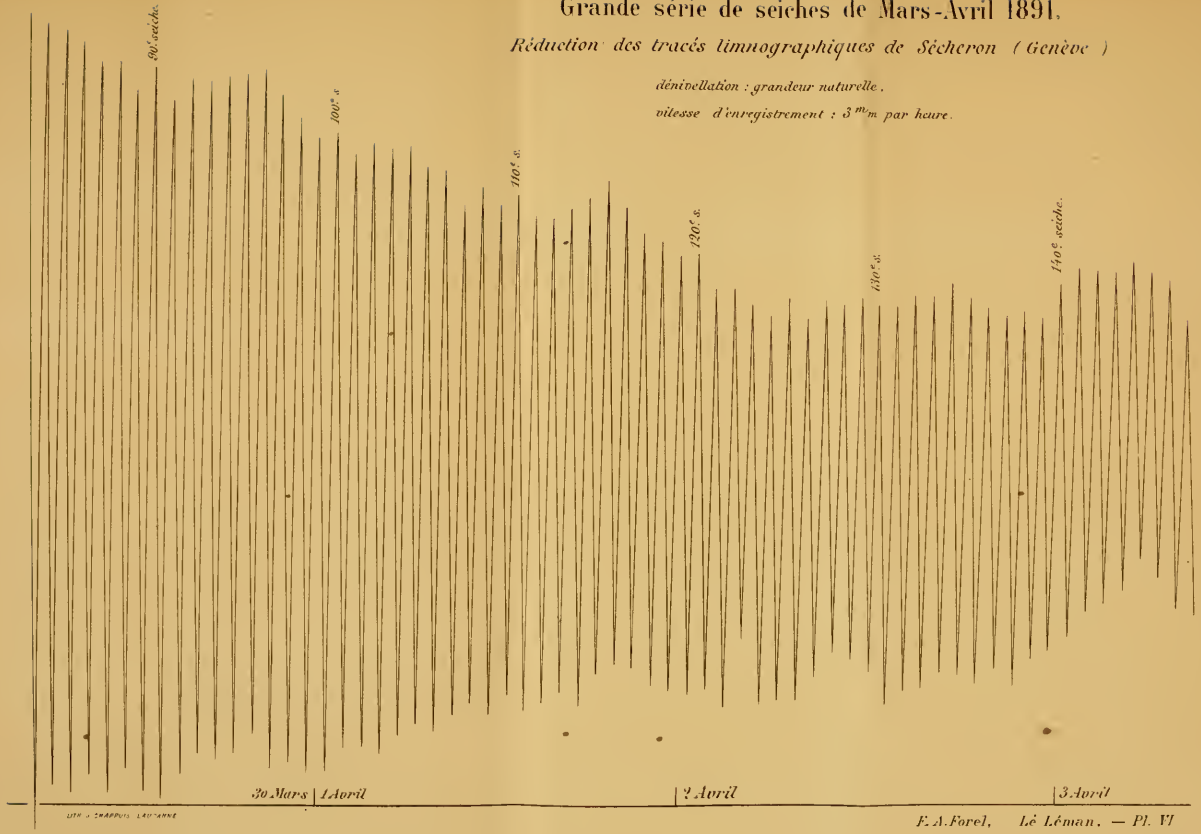
(2) Le sismographe de Palmieri, bassin rempli de mercure dont le liquide se déverse à chaque oscillation par les échancrures du vase, met en évidence les seiches en miniature, causées par le tremblement de terre.

Grande série de seiches de Mars-Avril 1891.

Réduction des tracés limnographiques de Sécheron (Genève)

dénivellation : grandeur naturelle.

vitesse d'enregistrement : 3 ^{m}m par heure.



LITH. J. CHAPPUIS LAUSANNE

effondrement du sol (vague de Krakatoa). Toutefois je ne puis m'empêcher de remarquer que, dans ce que nous allons appeler les vibrations du lac, que nous assimilerons par hypothèse à des seiches multinodales, la durée de l'oscillation est encore de $^1/_2$ ou 2 minutes, c'est-à-dire beaucoup plus grande que celle des oscillations sismiques ; que dans les vagues de transmission de l'Océan, la durée de la vague est de plusieurs minutes, ou de fractions d'heure, c'est-à-dire d'un tout autre rythme que celui des éléments de la secousse du tremblement de terre.

Mais je ne veux pas me perdre ici dans une discussion qui nous entraînerait trop loin de notre sujet, et je conclurai simplement : Nous ne possédons pas encore d'observations limnographiques de seiches produites par des secousses sismiques. Ou autrement : les seiches ordinaires ne sont pas causées par des tremblements de terre.

CONCLUSIONS

Je me suis étendu longuement sur la question des seiches. Cela m'a paru nécessaire pour justifier une théorie nouvelle sur un phénomène d'observation difficile, et compliqué dans ses apparitions. L'observation en est difficile, car sauf quelques circonstances exceptionnelles, les seiches ne se manifestent pas directement aux sens de l'homme ; et cependant, pour la compréhension du phénomène, il faut tenir compte aussi bien des petites seiches de quelques millimètres de hauteur que des grandes seiches historiques des Genevois. Le phénomène est compliqué, car les types des seiches sont divers, divers d'un jour à l'autre, divers d'une station à l'autre, divers d'un lac à l'autre ; et cependant, dans cette diversité, nous avons reconnu des lois générales, des faits généraux qui nous ont permis de constater l'ordre admirable qui règne au milieu de cette apparence de désordre.

Nous avons démontré la nature oscillatoire du mouvement des seiches ; nous avons constaté leur développement en séries ; nous avons reconnu l'analogie évidente avec les mouvements pendulaires. Tous les faits observés [1] s'expliquent et s'enchaînent facilement si nous

[1] S'il y en a encore quelques-uns en souffrance, par suite certainement d'insuffisance des observations, j'ai l'assurance qu'ils s'expliqueront aussi facilement et aussi bien que tous ceux qui nous ont successivement arrêtés.

admettons que les seiches sont des vagues d'oscillation fixe, des vagues de balancement. La formule mathématique rend parfaitement compte des phénomènes, et même la question délicate de la cause des seiches, si elle n'est pas encore aussi limpide que je la voudrais, ne nous pose plus de ces objections insolubles, qui nous ont si longtemps laissés en suspens.

L'hypothèse que j'ai proposée, il y a une vingtaine d'années, est bien près d'arriver à la dignité d'une théorie, grâce à la collaboration efficace et active des amis et collègues qui se sont attachés avec moi à ce problème, en particulier de MM. P. du Boys, à Annecy; A. Delebecque, à Thonon; Ch. Dufour, à Morges; Mansell, à Chalcis; H.-C. Russell, à Sydney; Ph. Plantamour, Ed. Sarasin, J.-L. et Ch. Soret, à Genève; E. de Zeppelin, à Constance [1]. Je veux espérer que tous ceux, connus ou inconnus, qui ont pris part à cette étude, y auront trouvé autant de satisfaction et de jouissances que moi, en sentant que nous arrivions à la solution d'un des problèmes les plus intéressants soumis à la curiosité de l'homme.

Il y a longtemps de cela, c'était en août 1875, j'étais assis sur une pierre de la grève à Romanshorn, et je suivais de l'œil le flotteur de mon plémyramètre qui oscillait sous l'impulsion des seiches du lac de Constance. Un habitant de la ville, un instituteur, je crois, qui m'avait vu stationner, sans motif apparent, pendant quelques heures sur cette plage marécageuse, me questionna sur mes recherches; je lui expliquai de mon mieux le phénomène des seiches et le but de mes études, mais quand il termina par un : « Zu was nützt das? » A quoi cela sert-il? je fus, je l'avoue, un peu interloqué. J'essayai de lui dire que je m'appliquais à la solution d'un problème de la nature; je ne sus pas lui indiquer d'utilité immédiate ou pratique, et mon interlocuteur se retira évidemment peu satisfait. Il avait l'air de voir en moi « un Monsieur qui ne craint pas de perdre son temps. » — Il est vrai que j'ai consacré à ces recherches bien des heures, bien des journées, bien des années de ma vie. Mais j'avoue que, dans mon for intérieur, je ne me suis jamais senti humilié d'avoir dépensé autant de cette denrée précieuse entre toutes, le temps qui s'écoule et ne revient pas, à un thème sans utilité immédiate et pratique. La recherche désintéressée

[1] Je les cite, ces noms, en ordre alphabétique, ne voulant pas, ne pouvant pas établir d'autre gradation dans cette énumération.

des faits et des lois de la nature n'est pas un travail vain et sans résultat : la grandeur de l'homme ne réside-t-elle pas en partie dans cette curiosité singulière qui l'entraîne à surprendre et à comprendre les secrets de la nature qui l'entoure ? n'est-ce pas une noble tâche que la recherche de la vérité, sous quelque forme qu'elle se présente à nous ?

N'est-ce pas quelque chose d'avoir trouvé une explication plausible des grandes seiches de Genève et une solution satisfaisante du problème de l'Euripe ?

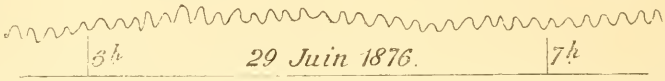
Mais il y a plus, et c'est là une des beautés de nos études scientifiques. Toute recherche, quelque désintéressée qu'elle paraisse au premier abord, peut amener, par des voies souvent bien détournées, à des résultats pratiques et utiles. Notre étude des seiches peut, elle aussi, avoir son utilité pratique. Quand il sera définitivement démontré que les mouvements de balancement de l'eau des lacs répondent aux lois générales de la mécanique pure, que l'oscillation des seiches suit le rythme que Merian a déduit des équations différentielles de la mécanique analytique de Lagrange, ou le rythme que M. du Boys a tiré de considérations d'hydraulique supérieure ; quand nous aurons trouvé une confirmation de quelques données de la théorie pure par l'observation directe d'oscillations qui mettent en mouvement de balancement aussi bien la masse énorme des 89 milliards de mètres du Léman, que les quelques litres d'eau de nos auges d'expérimentation, n'aurons-nous pas là une vérification précieuse ? Sur une échelle vraiment gigantesque, nous aurons la preuve de quelques-unes des lois qui sont à la base de la science humaine ; nous aurons, dans la faible mesure de nos forces, donné une certitude nouvelle au fondement scientifique sur lequel est bâti tout l'édifice du travail de l'humanité agissante, de l'humanité active et industrielle.

Mon cher inconnu de Romanshorn, à ta question : « Wozu nützt es ? » je réponds : « Es nützt doch etwas ».

XII. **Les vibrations du lac.**

Les tracés limnographiques montrent très fréquemment un dessin qui mérite l'attention. Au lieu de donner simplement la courbe des seiches, sous la forme d'une sinusoïde plus ou moins serrée, le tracé

présente de petites irrégularités, des dentelures fines dont nous avons déjà un exemple dans la figure 65 de la page 103. Ces broderies qui représentent des oscillations de un ou plusieurs millimètres de hauteur, dont les allures sont parfois très régulières, fig. 81, parfois très irrégu-



(Fig. 81.) — Vibrations. Limnographe non sensibilisé. grandeur naturelle. 6cm par heure.

lières, ont une durée qui varie de 20 secondes à 2 minutes.

Je désignerai les mouvements de l'eau qui causent ces broderies de nos tracés limnographiques sous le nom de *vibrations* du lac, nom indifférent qui ne préjuge rien, ni sur leur nature, ni sur leur cause.

Ces vibrations apparaissent sur les tracés de tout limnographe suffisamment sensible ; lorsqu'elles manquent absolument, c'est une preuve du défaut de délicatesse de l'appareil qui, soit par insuffisance de débit du canal d'alimentation (trop grande longueur de ce canal, ou diamètre trop faible), ou bien par trop de perte de mouvement dans les organes de transmission, ne dessine pas les très légères oscillations du lac [1]. Les vibrations existent, en effet, presque toujours ; je les ai reconnues sur la plupart des tracés limnographiques, dans tous les lacs et dans toutes les stations où j'ai installé mon plémyramètre, en constatant des mouvements saccadés dans les promenades du flotteur qui réagit avec une sensibilité exquise sous les plus faibles dénivellations de l'eau.

Les vibrations apparaissent sur les tracés du limnographe sous la forme de dentelures à sommets mousses, quand le débit du canal d'alimentation du puits est suffisant pour que l'eau s'équilibre à temps dans la durée d'une oscillation ; chacune des dentelures est alors une sinusoïde. Mais dans d'autres cas, lorsque la vibration est de grande hauteur, l'eau du puits n'a pas le temps de suivre les dénivellations du lac et les dentelures sont à sommets aigus.

Pour étudier plus en détail les vibrations, j'ai perfectionné de deux manières la sensibilité de mon limnographe de Morges. Tout d'abord

[1] Une telle absence de sensibilité d'un limnographe qui ne dessine pas les vibrations peut être considérée comme un avantage si l'on veut étudier uniquement les seiches, dont les courbes sont alors beaucoup mieux marquées, étant plus simples et non altérées. Mais c'est plutôt un inconvénient si l'on veut étudier la complication naturelle des divers mouvements du lac.

j'ai augmenté le débit du canal du puits ; à côté du tuyau de 8.4^{m} de long et de 6^{cm} de diamètre qui me donnait l'alimentation convenable pour l'étude des seiches, j'y ai adjoint un second tuyau de 80^{cm} de long et de 20^{cm} de diamètre, fermé par une vanne mobile qui permettait d'augmenter ou de diminuer, à volonté, la réaction du bassin limité du puits sous les dénivellations de la masse illimitée du lac. En second lieu, j'ai augmenté la vitesse d'enregistrement et je l'ai portée à 6^{mm} par minute ; les dentelures des vibrations, trop pressées dans l'enregistrement normal de 6^{cm} par heure, s'étalent mieux et se développent à loisir sur le papier, entraîné à cette grande vitesse.

En résumant les observations fort nombreuses que depuis vingt ans j'ai pu faire occasionnellement ou systématiquement sur ce phénomène, je lui décrirai les caractères suivants :

1° Les vibrations sont des oscillations régulières ou irrégulières de l'eau ; parfois leur régularité est parfaite.

2° Leur durée est variable d'un jour à l'autre, dans les limites de 15 ou 20 à 120 secondes (station de Morges).

3° Leur hauteur est variable d'un jour à l'autre, de 1^{mm} et moins à 5^{cm} et plus.

Avec ces dimensions, les vibrations sont un phénomène, un phénomène spécial qui mérite d'être étudié.

Avant de rechercher les conditions de leur apparition, éliminons tout d'abord une notion qui peut venir immédiatement à l'esprit de nos lecteurs, c'est que nous aurions à faire ici à des vagues proprement dites (vagues d'oscillation progressive), vagues du vent, vagues des bateaux à vapeur, etc. Il n'y a aucun rapport de vitesse entre les vibrations et les vagues ; ce que nous connaissons sous le nom de vagues sont des oscillations beaucoup plus rapides ; elles ne se dessinent pas du tout, quand elles sont faibles, sur les tracés de mon limnographe, même avec la sensibilité exagérée que je lui ai donnée pour l'étude des vibrations ; quand elles sont fortes, elles s'y dessinent avec de tout autres allures. Les plus grandes vagues de vent que j'aie mesurées à Morges, celles du 20 février 1879, avaient une durée de près de 5 secondes ; donnons 5 secondes comme durée maximale possible des plus grandes vagues du Léman ; les vibrations les plus rapides sont encore 3 à 4 fois plus lentes. Il n'y a pas moyen d'assimiler les deux ordres de phénomènes.

Cette supposition écartée, cherchons ce que peuvent être les vibra-

tions, et pour cela étudions dans quelles conditions elles apparaissent. Les broderies de mes tracés se rapportent à deux circonstances très différentes ; elles sont produites :

Par les bateaux à vapeur qui circulent sur le lac.

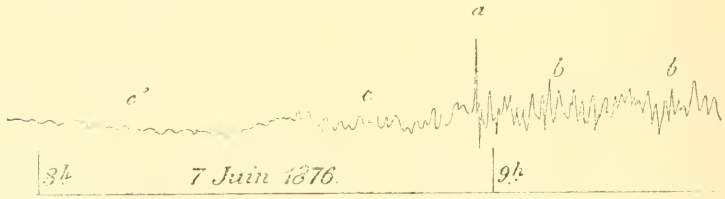
Par le vent.

La description qui va suivre se basera uniquement sur mes observations de Morges. Les tracés des autres limnographes qui ont passé sous mes yeux me permettent d'affirmer que les faits sont de même ordre dans les autres stations ; mais les appareils limnographiques ayant été en général réglés spécialement pour l'étude des seiches, on a éliminé autant que possible les broderies des oscillations rapides, et les vibrations y sont mal dessinées. Je n'ai aucune raison de supposer que ce que je vais dire de Morges ne soit également applicable à toute autre station d'un lac quelconque.

Après cette étude des deux classes de vibrations du lac, je dirai quelques mots de deux phénomènes qui touchent à ce même ordre de faits, le mascaret de la Morge et les vibrations de la mer.

1° *Vibrations causées par la marche des bateaux à vapeur.*

Un bateau à vapeur qui passe devant Morges [1] signale sa présence sur les tracés de mon limnographe par des broderies caractéristiques que je figurerai d'abord à petite échelle (fig. 82), d'après un



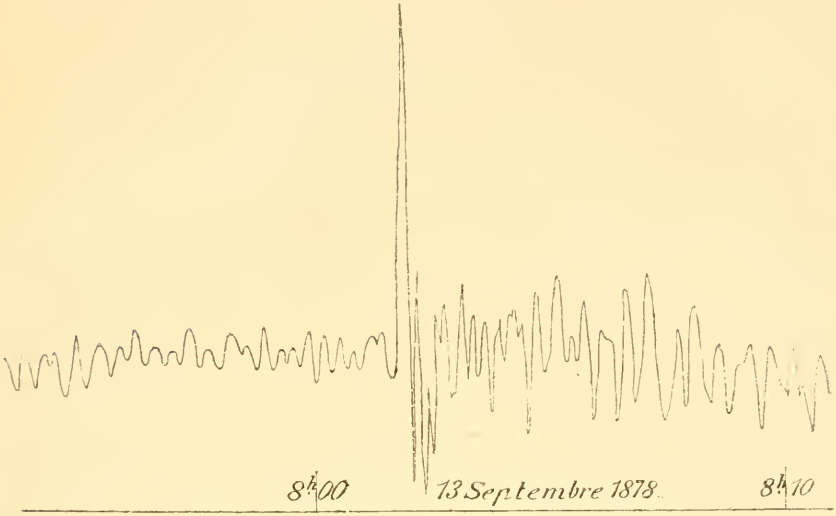
(Fig. 82.) — Vibrations des bateaux à vapeur. Morges. Grandeur naturelle, 6cm par heure.

tracé de mon limnographe de Morges, sans exagération de la sensibilité de l'appareil, et que je décrirai comme suit :

1° Au moment où le bateau à vapeur, qui a ralenti sa marche pour s'arrêter au débarcadère, passe devant mon jardin, la grande vague de refoulement soulève l'eau et dessine un trait vertical compliqué

[1] Le débarcadère des bateaux à vapeur est situé devant le jardin où j'avais mon observatoire, à environ 100m de distance.

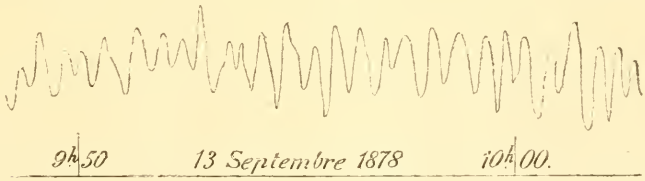
(fig. 82 *a*). Sans que je veuille en analyser les détails, je donne dans la fig. 83 le tracé d'une de ces vagues, amplifié par les procédés d'exa-



(Fig. 83.) — Passage d'un bateau à vapeur. Limnographe sensibilisé, 6mm par minute.

gération de sensibilité de mon limnographe que je viens d'indiquer (augmentation du débit du canal, et accélération de la vitesse d'enregistrement). Je n'insiste pas sur cette vague de bateau à vapeur, et je constate seulement qu'il y a un puissant ébranlement de l'eau par l'action perturbatrice de la masse du navire en mouvement.

2° Après le passage du bateau, le tracé montre des broderies (fig. 82 *b b*), qui durent fort longtemps et ne diminuent que très lentement de hauteur. Ces broderies, dont la fig. 84 donne un exemple



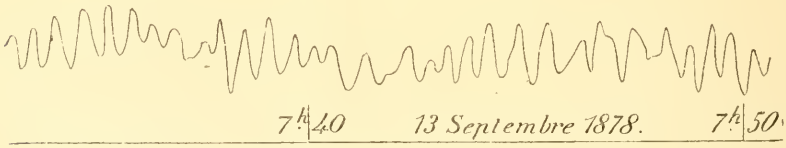
(Fig. 84.) — Vibrations consécutives d'un bateau à vapeur. Limnographe sensibilisé, 6mm par minute.

dessiné par le limnographe sensibilisé, représentent des oscillations dont la hauteur est au début de près d'un centimètre, et la durée de 30 secondes environ. C'est ce que j'appelle les vibrations consécutives des bateaux à vapeur. Ces vibrations continuent à agiter

le lac pendant des heures et des heures ; ce n'est que dans le milieu de la nuit, quand le dernier passage de bateau a eu lieu sur le lac vers les 8 heures du soir, que le lac reprend son calme, et que le tracé limnographique cesse de montrer des indices de broderies. Quatre ou cinq heures au moins, telle est la durée de l'action, reconnaissable à nos appareils, du passage d'un bateau à vapeur. Le navire est depuis plusieurs heures à l'ancre dans le port de Genève, que les souvenirs de son passage sont encore visibles au milieu du Grand-lac par l'existence de ces vibrations consécutives.

Vu du sommet de Naye ou de Dent d'Oche, un bateau à vapeur qui circule sur le lac semble une mouche qui se débat sur une jatte de lait ; c'est un point dans l'espace. Et cependant ce corps minuscule agite toute la masse du lac et la remue assez pour la faire vibrer pendant bien des heures. La force vive dégagée par la combustion du charbon sous la chaudière du pyroscaphe se transforme en travail mécanique qui s'épuise lentement dans ces vibrations consécutives, et, par les frottements des molécules de l'eau les unes sur les autres, se transforme de nouveau en chaleur. Une partie de la chaleur dégagée par la combustion du charbon est donc employée à réchauffer la masse de l'eau du lac. Les forces du monde physique ne se perdent pas, elles se transforment dans des cycles toujours et indéfiniment renaissants.

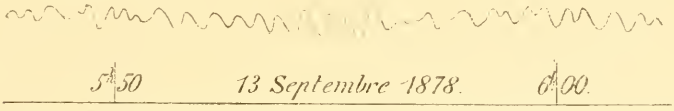
3° Mais longtemps avant l'arrivée du premier bateau à vapeur, qui, dans la matinée, touche au port de Morges vers 8 heures, je vois mon tracé limnographique dessiner des vibrations (fig. 82 *c c'*). Elles sont moins hautes que les vibrations consécutives ; leur durée est à peu près la même, une demi-minute environ pour chaque oscillation. Je reproduis, fig. 85, ces vibrations antécédentes d'un bateau à vapeur



(Fig. 85.) — Vibrations antécédentes d'un bateau à vapeur, 15 minutes avant le passage. Limnographe sensibilisé, 6mm par minute.

arrivant d'Ouchy. Le bateau n'abordera à Morges que dans 15 minutes, il est encore à 2 kilomètres de distance, et cependant avec le limnographe sensibilisé, on voit déjà des vibrations de près d'un centimètre de hauteur.

Ces vibrations antécédentes se propagent à de grandes distances. Dans le régime d'été, alors que les bateaux à vapeur commencent à circuler sur le lac à partir de 4 $^1/_2$ à 5^h, les tracés de mon enregistreur sensibilisé les font voir déjà dans ces heures matinales; tandis qu'aucun bateau ne se rapproche de Morges (les premiers passages ayant lieu à ce port à 7 ou 8^h seulement) tandis que les moins éloignés circulent entre Ouchy et Evian, c'est-à-dire à 10 et 14^{km} de Morges, les vibrations antécédentes des bateaux à vapeur y sont parfaitement évidentes. Dans la fig. 86, je copie les vibrations dessinées le 13 septem-



(Fig. 86.) — Vibrations antécédentes d'un bateau à vapeur, traversant le lac à plus de 6^{km} de Morges. Limnographe sensibilisé, 6^{mm} par minute.

bre 1878, à 5^h50, à Morges, alors que le premier bateau ne devait toucher à ce port qu'à 8^h. Les oscillations sont parfaitement caractérisées, et il est incontestable qu'elles se font manifestement sentir à plus de 10 kilomètres de distance.

Quelle est la vitesse de propagation de ces vibrations? Combien de temps mettent-elles pour traverser la largueur du lac? Je n'ai malheureusement pas d'observations assez précises pour répondre à cette question [1]. D'une part, le début des ondulations sur les tracés limnographiques n'est pas assez net; elles commencent par des dentelures de moins d'un millimètre de hauteur et s'accroissent progressivement; d'une autre part, à l'époque où je faisais ces études, le départ des bateaux à vapeur d'Ouchy et d'Evian était organisé de telle sorte que leur action utile devait être d'efficacité progressive. Il aurait fallu, pour que l'apparition des vibrations fût subite à Morges et se dessinât nettement sur les tracés limnographiques, que le premier départ eût lieu d'Evian, vis-à-vis de Morges; au lieu de cela, il y avait un bateau partant d'Ouchy pour Evian à 5^h10^{min}, et un autre, à 5^h30^{min}, partant d'Evian pour Ouchy.

[1] L'observation de ces vibrations n'est pas très facile. Comme nous allons le voir, le vent, même faible, détermine des oscillations très semblables; par conséquent, pour reconnaître les vibrations dues aux bateaux à vapeur, il est indispensable de s'adresser à des lacs de calme plat. Combien de fois, dans l'année 1878, où j'étudiais ces phénomènes, ai-je préparé, le soir, une série d'observations par un lac plat comme un miroir? combien de fois ma veille a-t-elle été interrompue par l'apparition d'une brise qui troublait l'expérience en développant des vibrations avec lesquelles les vibrations des bateaux à vapeur se seraient confondues?

Toujours est-il que, dans les deux expériences qui ont le mieux réussi, j'ai commencé à voir des vibrations notées par mon limnographe de Morges, le 19 juin 1878, à 5^h20^{min} ; le 13 septembre, à 5^h25^{min}, c'est-à-dire 10 ou 15 minutes après le départ du premier bateau d'Ouchy ; dans l'un et l'autre cas, les vibrations augmentèrent sensiblement de hauteur à 5^h40 et 5^h50^{min}, soit 10 à 20 minutes après le départ du premier bateau d'Evian.

Sans donc que je puisse donner des chiffres exacts pour la vitesse de la transmission des vibrations des bateaux à vapeur à travers les 10 à 14^{km} de la largeur du lac, je puis affirmer que cette vitesse est fort grande, et en tout cas très supérieure à celle de la propagation des vagues d'oscillation progressive (vague de refoulement des bateaux à vapeur). Cette vitesse semble être du même ordre de grandeur que celle de l'oscillation des seiches dans le diamètre transverse du lac.

Quelle est la nature du phénomène ? Je dois avouer ma parfaite ignorance à ce sujet. Je sais que ces vibrations ne sont pas des vagues d'oscillation progressive ; qu'elles n'ont rien à faire avec la vague que le bateau refoule de chaque côté de son corps en s'avançant dans le lac ; ces vagues ont de tout autres allures. Mais la nature même du mouvement, je l'ignore. — Seraient-ce des vagues d'oscillation fixe multinodales, des seiches à un grand nombre de nœuds ?

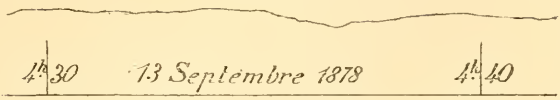
2° *Vibrations causées par le vent.*

Pour étudier ce second ordre de vibrations, je dois, en raison de ce qui vient d'être dit, m'adresser aux heures de la nuit, alors qu'aucun bateau à vapeur ne vient troubler par ses vibrations le jeu normal des mouvements intimes du lac. Dans ces conditions, je constate très fréquemment sur les tracés limnographiques l'existence d'ondulations plus ou moins accusées qui, ne pouvant être rapportées à l'action des bateaux à vapeur, doivent être attribuées à d'autres causes.

Les vibrations, que je rapporte à l'action du vent, se voient sur les tracés de tout limnographe de sensibilité moyenne ; en sensibilisant extraordinairement mon appareil, comme je l'ai dit plus haut (page 214), je leur trouve les caractères suivants :

a Au point de vue de la hauteur, les vibrations sont parfois si faibles, qu'elles n'atteignent pas un millimètre ; par le calme plat, elles

peuvent être nulles (fig. 87) ; parfois elles sont énormes et dépassent



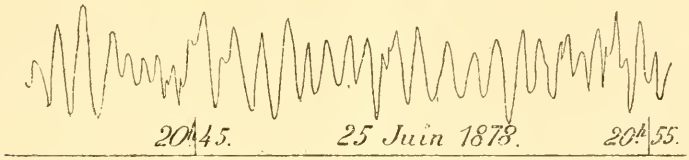
(Fig. 87.) — Calme plat au point de vue des vibrations. Limnographe sensibilisé, 6mm par minute.

5 et 10 centimètres.

b Au point de vue de la durée, elles varient de 20 à 60 secondes pour l'oscillation entière; j'en ai même vu de 2 minutes de durée (fig. 81).

c Au point de vue des allures, elles sont parfois aussi régulières que les plus belles seiches, ou que les rides qu'une faible brise dessine à la surface de l'eau ; d'autres fois, elles sont irrégulières, pressées, heurtées, entrechoquées.

d Au point de vue de la forme, sur les tracés tantôt les courbes sont arrondies en séries de sinusoïdes (fig. 88), tantôt ce sont des



(Fig. 88.) — Vibrations du vent en courbes sinusoïdes. Limnographe sensibilisé, 6mm par minute.

dentelures aiguës, à sommets pointus et à bords droits (fig. 89). Ce

(Fig. 89.) — Vibrations du vent. Courbes à sommets aigus. Limnographe sensibilisé, 6mm par minute.

dernier cas a lieu lorsque la hauteur des oscillations dépasse le degré de sensibilité de l'appareil limnographique.

Je pourrais facilement caractériser ces vibrations en les comparant aux seiches, avec lesquelles elles ont en commun la plupart de leurs qualités. Ce seraient des seiches très rapides si, au point de vue de la durée, je pouvais y reconnaître un rythme. Le rythme des vibrations

varie d'un cas à l'autre, et n'est pas, comme celui des seiches, appréciable par des chiffres constants ; je ne suis pas arrivé à déterminer le rythme des vibrations de Morges.

Quant aux circonstances dans lesquelles les vibrations se produisent, j'essaierai de les caractériser dans ces termes :

a Les vibrations sont nulles quand le lac est au calme plat.

b Les vibrations ont toujours lieu quand il fait du vent ; plus le vent est fort, plus elles sont grandes.

c Les vibrations ne sont pas proportionnelles à la grandeur des vagues ; un vent qui souffle de terre, et qui ne produit pas de vagues dans la station d'observation, détermine aussi bien des vibrations qu'un vent qui vient du large et développe des vagues énormes.

d Les vibrations accompagnent le vent, et non pas les vagues du vent. J'ai reconnu que les vagues mortes, sans vent, ne produisent pas de vibrations proportionnelles à leur grandeur.

D'après ces faits, j'attribue au vent l'origine de ces vibrations.

Je donnerai, en tableau, la durée et la hauteur des vibrations observées dans diverses circonstances, à Morges, avec mon limnographe sensibilisé. Lorsque les vibrations sont dessinées par des dentelures à sommets aigus, la hauteur réelle de la dénivellation du lac est supérieure à celle qui est donnée par le tracé.

DATE		ÉTAT DU LAC	CARACTÈRE DES VIBRATIONS		Durée moyenne des vibrations	Hauteur des dénivellations.
18 juin	1878	Calme plat	—	—	—	0mm
19 —	—	Sudois III	irrégulières	aiguës	41 sec.	>35
20 —	—	Morget	id.	arrondies	27	9
— —	—	Vaudaire III	id.	aiguës	25	>18
25 —	—	Bise II	id.	arrondies	28	15
— —	—	id. III	régulières	aiguës	27	>10
26 —	—	Rebat I	irrégulières	arrondies	23	15
28 —	—	Vaudaire III	id.	aiguës	?	>30
29 —	—	Calme après la vaudaire	régulières	arrondies	35	3
2 juillet	—	Joran	irrégulières	arrondies	25	5
3 —	—	Sudois III	id.	aiguës	24	>25
4 —	—	id. II	régulières	arrondies	28	3
— —	—	Morget faible	irrégulières	arrondies	27	3
5 —	—	id. id.	régulières	id.	27	2
10 —	—	Airs de Joran	irrégulières	aiguës	20	> 8
15 août	—	Sudois III	id.	id.	26	>25
26 —	—	id. III	id.	id.	21	>28
3 septembre	—	Bise III	id.	id.	25	>20
11 —	—	Bise II	id.	arrondies	24	12

DATE	ÉTAT DU LAC	CARACTÈRE DES VIBRATIONS	Durée moyenne des vibrations	Hauteur des dénivellations.
12 septembre 1878	Calme plat	régulières arrondies	—	< 1
22 — —	Bise II	irrégulières aiguës	30	> 15
13 octobre —	Bise III	irrégulières	50	—
29 avril 1879	Bise IV	id.	60	—
17 juillet —	Morget	id. aiguës	19	> 20
21 — —	Sudois IV	id. id.	23	> 25
17 septembre —	Vaudaire	id. id.	—	> 25
18 juillet 1881	Morget	régulières subaiguës	22	> 14
22 — —	Joran I	subrégulières aiguës	20	> 20
23 — —	Calme, grand beau	id. arrondies	23	6
26 — —	Sudois IV	irrégulières aiguës	—	>100
27 — —	Rebat après l'orage	subréguliér. subaiguës	18	11
31 — —	Rebat, grand beau	id. id.	23	11
12 août —	Rebat très faible	id. aiguës	20	> 10
13 — —	Sudois III	irrégulières id.	14	> 48
14 — —	Fort rebat	id. id.	13	11
17 — —	Sudois III	id. id.	—	> 30
19 — —	Vagues de vaudaire	id. id.	—	> 16

Je me borne à donner ces observations par ordre de dates ; j'ai essayé de les classer autrement, je ne suis arrivé à aucun résultat utile.

D'après les chiffres ci-dessus, la durée moyenne des vibrations serait d'environ 26 secondes.

Y a-t-il quelques relations entre les vibrations et les seiches ? Voici ce que je puis dire à ce sujet :

a Les deux ordres de phénomènes peuvent se superposer. Sur les tracés limnographiques, les ondulations des vibrations brodent sur les sinusoïdes des seiches, comme nous avons vu différents ordres de seiches interférer entre elles.

b Cependant, je crois avoir remarqué que lorsque les vibrations sont fortes, elles éteignent plus ou moins le mouvement des seiches ; c'est ainsi qu'à Genève, par le temps de bise où les vibrations sont considérables et se dessinent en traits pressés sur les tracés du limnographe de Sécheron, les seiches décroissent rapidement de hauteur, et les séries de seiches ont alors une durée relativement moins longue. Les vibrations semblent abattre les seiches.

— Quelle est la nature de ces vibrations causées par le vent ? En l'absence de meilleure explication, j'en suis réduit à supposer que ce sont des vagues d'oscillation fixe à un grand nombre de nœuds, des seiches multinodales. Mais je ne sais vraiment comment justifier cette

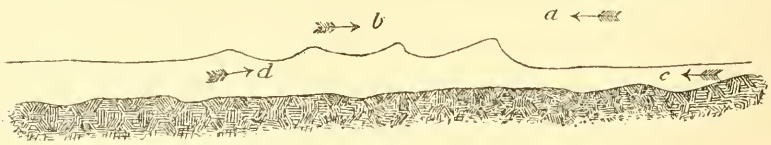
hypothèse, à laquelle je suis arrivé par exclusion de toute autre possibilité.

3° *Le Mascaret de la Morge.*

J'ai déjà dit que j'avais constaté, d'une manière autre que par les tracés limnographiques, l'existence des vibrations du lac ; je les ai retrouvées dans mes observations plémyramétriques où elles se dessinent par des mouvements saccadés et rapides du flotteur. J'en trouve encore une autre mise en évidence par un phénomène visible, en certaines circonstances, dans l'estuaire de la Morge, et qui n'est autre chose qu'un mascaret.

La rivière la Morge présente à son embouchure un long canal de 15m de largeur, à pente très faible, dans lequel le lac en hautes eaux remonte assez loin. Lorsque la hauteur du lac est telle que ses eaux remontent dans la Morge, mais n'y ont qu'une profondeur minime, quelques centimètres, nous observons souvent dans cet estuaire le phénomène suivant. Les eaux de la rivière sont calmes, et, le débit étant très faible, s'écoulent lentement vers le lac ; mais à intervalles plus ou moins réguliers, une série de 2, 3 et 4 vagues remontent le cours de l'eau pour venir mourir au point où la nappe horizontale du lac s'unit au plan très faiblement incliné de la rivière. Ces vagues sont très serrées et se pressent l'une derrière l'autre ; en aval de ces vagues, on peut reconnaître un léger courant remontant, en amont le courant descendant est visiblement exagéré ; en aval de ces vagues, le niveau de l'eau est de un ou deux centimètres plus élevé que celui de l'eau amont. Ces vagues sont parfois assez fortes pour rouler sur elles-mêmes, et pour écumer ; leur hauteur est de plusieurs centimètres ; elles sont très visibles et ont été observées aussi bien par M. Ch. Dufour que par moi-même.

Le schema (fig. 90) donnera une idée de l'apparition ; la flèche *a*



(Fig. 90.) — Mascaret de la Morge. Coupe schématique.

indique le cours de la rivière, la flèche *b* le sens de la propagation des vagues en question, les flèches *c* et *d* le courant de l'eau en amont et

en aval du mascaret. C'est un mascaret en miniature, analogue, dans ses dimensions réduites, à celui qui se développe dans les estuaires débouchant à l'océan, sous l'action de la marée montante ; nous y pourrions reconnaître tous les détails du phénomène, exagération vers les rives du canal, exagération sur les bas-fonds, formation et entrecroisement des éteules ou vagues du mascaret, etc. Nous n'hésitons pas à leur appliquer le nom de mascaret.

Ces mascarets se succèdent à intervalles plus ou moins réguliers ; j'ai noté, en plusieurs occasions, l'instant où les mascarets passaient devant un repère de la berge ; je donnerai deux exemples des allures du phénomène.

1er octobre 1892. Vagues mortes de rebat.

Passage du mascaret dans l'estuaire.	Intervalle entre les passages.
17h 6min 20 sec	—
7 20	60 sec
— 40	20
9 00	80
— 35	35
10 35	60
11 25	50
	moyenne 51 sec

3 octobre 1893. Sudois III.

Passage.	Intensité.	Intervalle.
10h 55min 15 sec	—	—
— 45	—	30 sec
56 00	IV	15
— 20	II	20
— 40	III	20
57 55	IV	75
58 25	IV	30
— 40	I	15
— 50	IV	10
59 20	III	30
— 40	IV	20
	moyenne	26 sec

Les mascarets qui se suivent ont une intensité assez variable ; j'en ai donné une idée dans l'observation du 3 octobre 1893, en notant par un facteur de I à IV la grandeur relative du phénomène : parfois les vagues sont presque nulles, et d'observation très difficile. Suivant donc que j'ai noté ou négligé ces mascarets très faibles, la moyenne d'une série d'observations peut en être sensiblement relevée ou déprimée. Puis, si l'attribution que je vais faire de ce mascaret à l'action des vibrations du lac est juste, je puis difficilement séparer les vibrations dues au vent, de celles dues aux bateaux à vapeur.

Toujours est-il que voici la durée moyenne de la période qui sépare les mascarets successifs, dans quelques observations faites dans l'estuaire de la Morge, par des états du lac fort divers :

Nos	Dates	Etat du lac.	Durée moyenne.
I	1er octobre 1892	Vagues mortes de rebat	51 sec
II	7 — —	Grand sudois, durée des vagues 2.5sec	31
III	11 — —	Sudois II	45
IV	12 — —	Sudois I, vagues de 2.5sec	40
V	22 — —	Sudois III — de 3sec	36
VI	11 décembre 1892	Sudois III	51
VII	22 septembre 1893	Sudois III	25
VIII	29 — —	Joran II	29
IX	3 octobre 1893	Sudois III	26
X	11 — —	Grand beau, grand calme	62
XI	20 — —	Bise II	32
XII	— — —	Après le passage d'un bateau à vapeur	28
		moyenne	38 sec

La durée moyenne de retour périodique de nos mascarets est donc de 38 secondes environ, un peu plus d'une demi-minute.

J'avais d'abord pensé à attribuer ces vagues, qui remontent l'estuaire de la Morge, à la propagation de ce qu'on appelle la 7e vague. On sait que, dans les vagues du vent, l'intensité des vagues successives est très inégale ; qu'il y a de temps en temps recrudescence notable de la grandeur des vagues ; deux ou trois vagues sont de hauteur maximale, puis les suivantes sont relativement faibles ; les marins désignent ces fortes vagues d'intensité extrême sous l'épithète de la 7e vague. J'avais pensé que, tandis que les vagues relativement faibles se seraient éteintes à l'embouchure de l'estuaire, les vagues plus fortes se seraient

propagées plus loin, et auraient seules apparu au point où je faisais mon observation. Mais cette hypothèse tombe devant les chiffres que je viens de donner. On y voit la période de ce que j'appelle le mascaret être aussi longue lorsque les vagues sont nulles ou très faibles (observations I, X, XI, XII), que lorsque le lac est tourmenté par des vagues violentes. Il n'y a pas proportion entre la période du mascaret et la grandeur des vagues qui viennent battre à l'embouchure de la Morge.

Nous en restons donc à notre notion, que les vagues en question remontant l'estuaire de la Morge sont bien un mascaret. Un mascaret est dû à la crue des eaux de l'estuaire par le fait de la marée montante ; pour qu'il y ait crue de l'estuaire, il faut apport d'eau ; cet apport ne se fait pas sans courants ; les frottements de l'eau sur le plafond et sur les bords du chenal déterminent les vagues et le roulement du flot du mascaret. Le mascaret de la Morge est donc dû à une crue du lac.

Parmi les dénivellations périodiques du lac, quelle est celle dont le rythme correspond à celui du mascaret ? Ce ne sont pas les seiches qui, à Morges, ont 10 et 5 minutes de durée ; ce ne sont pas les vagues du vent ou des bateaux à vapeur qui ne dépassent pas 5 secondes au maximum. Les seules oscillations du niveau de l'eau qui se rapprochent de la demi-minute que dure la période du mascaret de la Morge, sont les vibrations du lac.

J'attribue ce mascaret de l'estuaire de la Morge aux vibrations du lac, aussi bien à celles causées par le vent qu'à celles dues aux bateaux à vapeur.

4° *Les vibrations de la mer.*

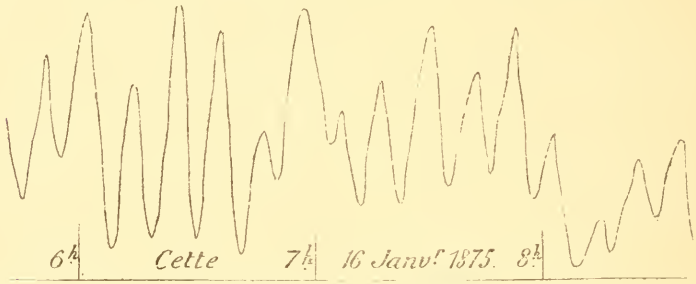
Nous n'avons pas à chercher des seiches dans la mer ; le bassin de l'océan est trop large pour que nous puissions espérer y voir se développer un balancement simple, uninodal ou binodal. Tout au plus dans certaines méditerranées, dans leurs parties les plus étroites (le canal d'Irlande, la mer Adriatique, le golfe de Bothnie, la mer Rouge, le golfe Persique, etc.), pourrait-on peut-être en retrouver des analogues ? Cette recherche n'a pas encore été faite.

En revanche, les vibrations que nous venons de constater dans nos

lacs, si elles sont ce que nous supposons, des vagues d'oscillation fixe à nombre considérable de nœuds, doivent exister dans la mer ; avec des marégraphes suffisamment sensibles on les y décélerait.

En réalité, si l'on étudie les tracés marégraphiques, on retrouve, très fréquemment, des indications plus ou moins nettes d'oscillations à courte période, qui n'ont rien à faire avec la marée ; elles sont surtout visibles dans les moments où la mer est étale, et où, par conséquent, l'appareil enregistreur a son maximum de sensibilité. Les oscillations, je les ai trouvées partout où je les ai cherchées. Sur diverses collections de tracés marégraphiques, en particulier à Cette et à Venise, j'ai même vu le phénomène avec de grandes allures et un beau développement.

A Cette, grâce à l'obligeance de M. Delestrac, ingénieur du port, j'ai pu prendre en 1879 des calques de tracés du marégraphe, et j'y retrouve des oscillations très bien marquées. Elles ont plusieurs types, entr'autres celui de 5 minutes de durée (1er février 1875, 21 janvier 1876, 16 janvier 1878), de 12 minutes (les 8, 16, 21, 29 janvier 1875, 19 janvier 1878), de 15 minutes (les 10 et 11 janvier 1877, le 24 janvier 1878), de 20 minutes (le 3 janvier 1875). Je donne à la figure 91 un



(Fig. 91.) — Vibrations de la mer. Marégraphe de Cette. Grandeur naturelle, 3cm par heure.

exemple de quelques-unes de ces oscillations du 16 janvier 1875 ; on y verra le phénomène parfaitement dessiné.

A Venise, M. le comte Antoine Contin de Castelseprio, ingénieur hydrographe, a eu l'obligeance de me communiquer, en 1881, les tracés du marégraphe du Lido, et j'y ai retrouvé de même des oscillations périodiques plus ou moins régulières, atteignant 10 et 20 centimètres de hauteur, et de durée variant, suivant les jours, de 10 à 12, à 40, à 50, à 90 minutes (tracés de 1872 à 1874).

Dans les deux cas, les allures des tracés marégraphiques montrent,

très nettement, que le développement de ces oscillations est en rapport avec l'état de la mer ; comme pour nos vibrations du lac, ou comme pour les seiches, elles sont plus grandes, mieux marquées, plus régulières certains jours que d'autres, dans certaines périodes que dans d'autres. Je n'ai nul doute que, si j'étais aussi bien familiarisé avec les tracés de ces marégraphes que je le suis avec ceux du limnographe de Morges, je saurais y lire facilement l'état de la mer, d'après les broderies qui diversifient la courbe de la marée.

Ce n'est pas seulement dans ces stations que les vibrations de la mer sont évidentes. Chaque fois que j'ai eu l'occasion d'étudier des tracés marégraphiques, j'en ai constaté au moins des indices. Voici, en tableau, la durée et la hauteur de celles dont je retrouve des calques dans mes notes :

Mer.	Marégraphe.	Dates.	Durée moyenne d'une vibration.	Hauteur de la dénivellation.
Méditerranée.	Cette (1)	1875-1877	de 5 à 20^{min}	—
	Marseille (2)	5 août 1885	50	—
	Livourne (3)	1882	de 12 à 20	3 à 8^{cm}
	Naples (3)	1879	de 12 à 15	3 à 10
	Palerme (3)	1888	15	8
	Ravenne (3)	janvier 1882	de 15 à 20	5 à 10
	Venise (4)	1873-1874	de 10 à 60	3 à 20
	Malte (5)	juin 1872	de 20 à 25	22 à 40
Atlantique	Brest (6)	1850	15	—
	Le Helder (8)	18 février 1854	60	35
	Swansea (5)	décembre 1837	15	—
Océan indien	Carwar (7)	janvier 1880	15	8
	Paumben (7)	avril 1880	de 10 à 15	2
	Beypore (7)	1880	20	2

(1) Communiqué par M. Delestrac, ingénieur, à Cette.

(2) La Nature, XVIII, I, 146, Paris, 1890.

(3) Communiqué par M. le commandeur A. Betocchi, à Rome.

(4) Communiqué par M. le comte Contin de Castelseprio, Venise.

(5) Communiqué par G. Airy, astronome royal, à Londres.

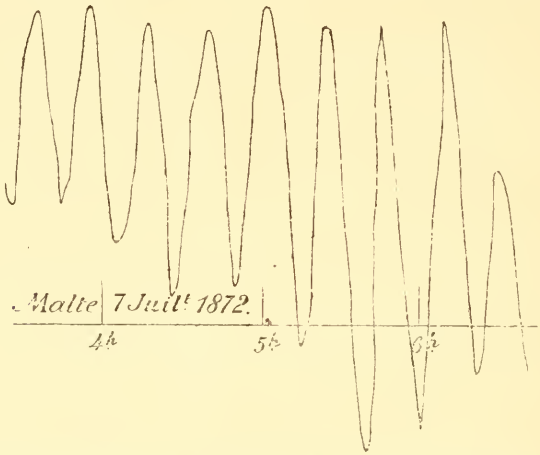
(6) Communiqué par M. J. Janssen de l'Institut de France.

(7) Collection de tracés à l'exposition de Géographie de Venise, 1881.

(8) *Hugo Lentz*, Fluth und Ebbe, fig. 39, Hamburg, 1879.

On retrouve partout, dans ces observations, des oscillations de la nappe d'eau plus ou moins régulières, de durée relativement courte, qui n'ont aucun rapport avec la vague de marée, qui varient pour la durée, la hauteur et les allures d'un jour à l'autre, et d'une station à l'autre. Par ces caractères, elles ressemblent d'une manière frappante à nos vibrations du lac. Elles sont toujours beaucoup plus longues que ces dernières qui varient, pour leur durée, de 1/4 à 1 ou 2 minutes ; mais, la grandeur du bassin de la mer étant infiniment plus considérable, je ne vois rien d'étonnant à ce que le même phénomène ait une amplitude beaucoup plus grande dans la mer que dans notre lac.

Je crois devoir donner encore un exemple de ces vibrations de la mer ; je reproduis, à la fig. 92, une partie d'un tracé du marégraphe



(Fig. 92.) — Vibrations de la mer. Marégraphe de Malte. Grandeur naturelle, 2cm par heure.

de Malte du 7 juillet 1872, qui montre d'une manière saisissante le caractère périodique régulier de ces oscillations. L'astronome royal de Londres, G.-B. Airy, qui me les communiquait, y voyait de véritables seiches, ou un mouvement de balancement établi entre la côte de Sicile et l'Afrique (1). Les dimensions ainsi limitées auraient impliqué, si cela avait été des seiches uninodales ou binodales, une durée beaucoup plus considérable que les quelque 20 minutes, durée moyenne

(1) *G.-B. Airy*, in litt. 24 novembre 1877.

de ces oscillations. En tous cas ce doit être des seiches multinodales, des vagues d'oscillation fixe à un grand nombre de nœuds.

Provisoirement, et jusqu'à une étude plus complète que je me permets de recommander aux physiciens-océanographes, j'assimilerai les oscillations que je viens de décrire à nos vibrations du lac, et je les appellerai, faute de mieux, les vibrations de la mer.

XIII. **Les vagues.**

(Vagues proprement dites, vagues d'oscillation progressive.)

Tout ébranlement rapide, porté en un point déterminé sur un liquide dormant, amène un mouvement local des molécules qui se transforme en une oscillation. L'oscillation qui, alternativement, relève les molécules fluides au-dessus et les abaisse au-dessous de leur position d'équilibre en repos, se traduit à la surface par l'ondulation des vagues, arêtes allongées à crêtes parallèles, séparées par des ravins également parallèles. Ces crêtes et ravins se déplacent par un mouvement d'ensemble, dans une direction normale à l'arête des vagues, en s'éloignant du lieu d'origine de l'impulsion. On les appelle vagues d'oscillation progressive, et comme ce sont les seules vagues qui soient manifestement visibles, les seules qui aient été reconnues par l'observation populaire, ce sont les vagues proprement dites, les vagues.

J'ai eu rarement l'occasion de m'occuper des vagues, quoiqu'elles s'offrissent constamment à mon observation ; les problèmes souvent difficiles qu'elles soulèvent ne se sont pas rencontrés sur ma route, ou si l'on veut, je les ai trop négligés. Je me bornerai donc à en résumer rapidement, à ma manière, la théorie, d'après les études les plus modernes [1], et j'y ajouterai les faits qui concernent spécialement les

[1] Je renverrai le lecteur à la belle étude théorique que le professeur O. Krümmel, de Kiel, a donnée dans le IIe volume de l'Oceanographie, (*G. von Boguslawski* und *O. Krümmel*, Ozeanographie II, 1 sq., Stuttgart 1887). On peut consulter aussi avec avantage le mémoire intitulé : « Vagues et courants », publié par M. J. Thoulet dans la Revue maritime et coloniale CXII, 57, sq., Paris 1892 ; outre ses études personnelles, l'océanographe de Nancy y a traduit et condensé le chapitre de Krümmel sur le même sujet.

vagues de notre lac. Puis, je traiterai, dans deux paragraphes spéciaux, de questions qui se relient aux vagues, et qui ont spécialement attiré mon attention, les taches d'huile et les rides de fond.

1° *Les vagues*

Il me paraît inutile de résumer ici la théorie du mouvement ondulatoire des vagues basée sur les propriétés des courbes cycloïdes et trochoïdes. Je n'arriverai pas à en faire usage.

On appelle longueur (λ) de la vague la distance qui sépare deux points homologues dans deux vagues voisines, les deux crêtes par exemple.

Hauteur ($2\,h$), la distance verticale entre le sommet de la crête et le fond du ravin de la vague. La longueur et la hauteur s'expriment en mètres.

Durée (t), le temps qui sépare le passage sous le même point fixe de deux points homologues de deux vagues consécutives ; la durée s'exprime en secondes.

Vitesse (v), l'espace parcouru en une seconde de temps par la crête de la vague dans sa progression à la surface du liquide ; la vitesse s'exprime en mètres par seconde.

La face antérieure de la vague est celle vers laquelle la crête s'avance, la face postérieure, celle dont elle s'éloigne.

Quel que soit le type de la vague que l'on considère, nous y retrouvons toujours les faits généraux et les relations que voici :

a La vague est un mouvement d'oscillation. Une vague n'est donc jamais isolée ; elle est toujours suivie d'une série d'oscillations analogues, de longueurs égales, de hauteur successivement décroissante jusqu'à zéro.

b A la surface, l'eau subit sous le passage de la vague un mouvement vertical, alternativement ascendant et descendant.

c A la surface, l'eau subit, sous le passage de la vague, un mouvement horizontal, dans le sens de la progression de la vague pendant que la vague est haute, en sens inverse pendant que la vague est basse.

d Si l'on simplifie, en enlevant quelques termes négligeables, les

équations trop compliquées du mouvement de l'oscillation progressive, on obtient les relations suivantes entre les principaux facteurs des vagues sur une eau de profondeur infinie ou de profondeur assez grande pour que l'action du fond puisse être considérée comme nulle.

$$t = \sqrt{\frac{2\pi}{g}} = 0.8\sqrt{\lambda}$$

$$v = \sqrt{\frac{g}{2\pi}\lambda} = 1.25\sqrt{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{g t^2}{2\pi} = 1.56\, t^2$$

Les trois facteurs principaux de la vague, la longueur, la durée et la vitesse sont donc associés ensemble, et varient simultanément.

A l'aide de ces formules, on peut calculer les valeurs numériques des fonctions associées des vagues. Voici les chiffres utilisables sur notre lac.

t Durée.	λ Longueur.	v Vitesse de progression.
0.5sec	0.4m	0.8m sec
1	1.6	1.6
2	6.2	3.1
3	14	4.7
4	25	6.2
5	39	7.8

e Il n'y a aucun rapport nécessaire entre la hauteur des vagues et leur longueur. Cependant, en général, plus les vagues sont hautes, plus elles sont longues. Une forte impulsion cause des vagues plus longues et plus hautes qu'une impulsion faible.

f Les vagues peuvent s'accroître en dimensions, lorsque l'action génératrice est continue ; dans ce cas, la hauteur de la vague s'accroît en même temps que sa longueur.

g Si l'action génératrice est temporaire, ou si, étant continue, elle cesse, la vague décroît de hauteur ; les équations qui lient la longueur, la vitesse et la durée persistent au contraire jusqu'à l'annulation du mouvement par décroissance de la hauteur.

h Lorsqu'une vague, venant du large, arrive vers la côte en passant

sur des régions de moins en moins profondes, elle subit les modifications suivantes :

Sa vitesse se ralentit et devient proportionnelle à la racine carrée de la profondeur p.

$$v = \sqrt{2gp}$$

Sa longueur diminue, les crêtes se rapprochent ; la longueur de la vague est proportionnelle à la profondeur.

$$\lambda = 2\pi p$$

Sa hauteur s'exagère, la crête se surélève, elle forme une volute qui se brise en écumant.

Quant à sa durée, elle n'est pas altérée ; c'est le seul des caractères de la vague qui puisse s'observer avec fruit sur le rivage.

i Par le ralentissement que les vagues subissent en s'approchant du rivage, les crêtes des vagues tendent à devenir parallèles à la côte ; les vagues battent la grève perpendiculairement à celle-ci.

Nous admettons quatre types de vagues d'oscillation progressive.

1° La vague solitaire circulaire causée par un choc unique localisé en un point. Une pierre, un grêlon, une goutte d'eau tombe dans l'eau, une rame, un bâton frappe l'eau : l'ébranlement produit une vague dont les dimensions, longueur, hauteur et vitesse, sont fonctions de l'intensité du choc. Minuscule, si c'est une goutte de pluie, elle peut être forte si c'est une grosse pierre qui la produit, elle peut être énorme sous l'éboulement d'une montagne (vague de Krakatoa). La vague se propage centrifugalement en cercles de plus en plus grands ; à mesure que le cercle grandit, la hauteur de la vague diminue, l'amplitude du mouvement s'éteignant en se dispersant dans une plus grande masse d'eau. La longueur, la vitesse et la durée de la vague restent cependant toujours les mêmes.

J'appelle cette vague : solitaire ; elle n'est cependant pas unique ; elle est toujours suivie d'une série d'oscillations de hauteur décroissante. Nous pouvons les appeler les vagues consécutives. Leur nombre varie suivant la grandeur de l'impulsion de 4 ou 5 à 50 et plus. En même temps, on voit la plus forte vague précédée de quelques ondulations, moins hautes que la vague principale, en nombre plus faible

que celui des vagues consécutives. Ce seraient les vagues antécédentes.

La vague solitaire est donc formée d'un groupe de vagues qui, de l'avant à l'arrière, grandissent d'abord en hauteur, puis décroissent. Or, si de l'œil on en suit les crêtes, on constate que la même vague ne garde pas toujours la même position dans le groupe ; ce n'est pas toujours la même vague qui est la plus haute. Au milieu de la progression générale du groupe, chaque vague se déplace d'arrière en avant, tellement, que ce qui était la 3e vague au bout d'un instant est la deuxième, au bout d'un instant est la première vague ; il y a renouvellement continuel des vagues qui apparaissent à la partie postérieure du groupe, disparaissent à la partie antérieure. La vitesse de progression de chaque vague individuelle est plus grande que la vitesse de propagation de la série des vagues considérée dans l'ensemble.

2° La vague solitaire rectiligne, causée par la progression d'un corps solide qui s'avance dans l'eau. Un bateau creuse son sillon dans le lac ; à chaque instant il donne naissance des deux côtés de sa proue à deux vagues solitaires, l'une grande, l'autre petite, qui s'avancent perpendiculairement à l'axe de marche du bateau. Pour chacune de ces deux ondulations, les diverses vagues formées ainsi les unes après les autres dans les instants successifs seraient, si elles étaient isolées, chacune une vague circulaire ; mais en s'ajoutant et se combinant avec leurs voisines immédiates, la résultante de ces vagues élémentaires circulaires est une vague rectiligne qui diverge des deux côtés de la ligne de marche du navire. On pourrait prouver que l'angle formé par ces deux lignes divergentes est d'autant moins aigu, d'une part que la marche du bateau est plus lente, d'autre part que le tonnage du navire est plus fort. Les vagues de nos bateaux à vapeur du Léman divergent en faisant entre elles un angle de 50° environ.

Cette vague solitaire rectiligne est comme la solitaire circulaire constituée par un groupe de vagues antécédentes et consécutives à renouvellement incessant.

La vitesse et la longueur des deux vagues sont approximativement pour nos bateaux à vapeur du Léman :

Grande vague	vitesse (v)	$2.5^{m\,sec}$	longueur (λ)	4^m
Petite vague	—	1.7	—	1.9

3° Les vagues associées, causées par le frottement dans l'eau d'un corps solide en mouvement. Un bateau laisse dans sa trace une

série de vagues dont les crêtes sont perpendiculaires à l'axe du bateau et qui progressent en avançant dans le même sens que lui, mais moins vite. Un poisson qui nage près de la surface, décèle sa présence par des vagues analogues qui marquent son sillage.

4° Les vagues associées, causées par le frottement sur le liquide d'un fluide aériforme, les vagues du vent. Les souffles du vent attaquent l'eau non sur un point, mais sur une surface; ils mettent l'eau en oscillation, non par une vague solitaire, mais par une série de vagues combinées entre elles; ce n'est pas un groupe de quelques vagues antécédentes et consécutives qui s'avancent sur la nappe de l'eau, mais une série indéfinie de rides parallèles, de même longueur, de même forme, de même vitesse, de même durée. Sous le souffle d'une brise légère, à la côte sur le vent, on voit le lac se couvrir d'un moiré parfaitement régulier de rides, dont les arêtes sont perpendiculaires à la marche du vent.

Mais l'action du vent ne cesse pas après le premier souffle; il continue et, son effet s'additionnant aux effets précédents, les rides augmentent de dimensions à mesure qu'elles avancent en plein lac; elles passent bientôt à la dignité de vagues; si le vent est suffisamment fort, elles deviennent des lames. Ces vagues se compliquent sitôt qu'elles atteignent des dimensions un peu considérables; sur les faces des grandes lames, le vent peut soulever de nouvelles rides, et l'oscillation de l'eau peut montrer, dans les fortes tempêtes, l'interférence d'ondes nombreuses, de grandeurs diverses.

Les vagues sont d'intensité nulle à la côte sur le vent; d'intensité maximale à la côte sous le vent.

Sous des vents d'intensité égale, la grandeur des vagues augmente en fonction du chemin parcouru. Sur le Léman, les grandes vagues de bise battent la côte de Savoie, à l'ouest d'Evian, et le Petit-lac; à Genève, elles peuvent être énormes; les grandes vagues du sudois frappent le Haut-lac, sur la côte Suisse, à partir de Morges et d'Ouchy; les grandes vagues de vaudaire battent la partie moyenne du Grand-lac, de Vevey à Morges, ce vent n'allant guère au-delà de Morges ou St-Prex; les grandes vagues du joran battent surtout la côte savoyarde du Haut-lac.

Les plus forts vents qui soufflent sur le Léman étant le sudois et la bise, les plus fortes vagues sont les vagues du sudois, qui viennent battre la rive de La Vaux, et les vagues de la bise à Genève.

Mais le Petit-lac ayant une profondeur beaucoup plus faible que le Grand-lac, et le peu de profondeur agissant en raccourcissant les vagues, et en exagérant leur hauteur, nous pouvons dire qu'à intensité égale du vent, les vagues du Grand-lac sont plus longues et plus rapides, celles du Petit-lac plus hautes. Quant à la durée, elle n'est pas influencée par le facteur profondeur. D'après cela, les plus longues vagues seront celles du sudois, sur le Grand-lac, les plus hautes, celles de la bise de Genève.

Quelles sont les dimensions réelles des vagues du Léman? J'en ai fait de nombreuses mesures qui sont toutes entachées d'inexactitudes, provenant de la difficulté de l'observation en plein lac, et pour les observations au rivage des altérations que subit la vague quand elle se rapproche de la côte. Les seules mesures valables, sans correction, sont celles qui cherchent la durée de la vague; et encore ne sont-elles pas très sûres, le compte étant difficile à faire, vu les irrégularités des vagues.

Le chiffre le plus élevé que j'aie obtenu regarde les vagues de l'ouragan cyclone du 20 février 1879, à 10 heures du soir. La durée de la vague était à Morges de 4.7 secondes. Cela correspond, d'après les formules ci-dessus données, sur une eau de profondeur infinie, à une longueur de vague de 34.5^{m}, et une vitesse de transmission de $7.3^{m\,sec}$, soit plus de 26^{km} à l'heure [1]. La tempête du 20 février a été la plus terrible que de mémoire d'homme on ait ressentie sur notre lac. On peut donc admettre que ce sont probablement les dimensions des plus grandes vagues du Léman.

Quelle est la hauteur des plus grandes vagues du Léman? Pour répondre à cette question, nous ne pouvons faire usage des faits que nous voyons sur la côte; ni les vagues qui déferlent sur une plage inclinée, ni les colonnes soulevées par les vagues qui battent contre le mur d'un quai ne sont des vagues normales; elles sont déformées, exagérées en hauteur par le peu de profondeur de l'eau. Les évaluations que j'ai faites de la hauteur des plus grandes vagues sur lesquelles j'aie navigué en plein lac, arrivent au chiffre de 1.5^{m} pour la hauteur verticale entre le fond et la crête de la vague. Avec la formule

[1] C'est conforme à l'observation. Le pilote Morel, dit Guérin, de l'*Aigle*, m'a affirmé que, en cas de « tout gros temps », les vagues venaient battre la poupe du bateau à vapeur en pleine marche vent arrière. Nos bateaux ont une vitesse de 20 à 22^{km} à l'heure.

générale qui attribue aux vagues le vingtième de leur longueur, si 34^m est la plus grande longueur des vagues du lac, leur hauteur en eau profonde ne doit pas dépasser 1.75^m. C'est assez bien conforme à l'observation.

Jusqu'à nouvel avis, je donnerai donc aux plus grandes vagues du Léman, en plein lac, les dimensions suivantes :

Longueur	35^m
Hauteur	1.7^m
Vitesse	$7.3^{m\ sec}$
Durée	4.7^{sec}

C'est peu de chose en comparaison des immenses vagues de la mer. C'est déjà beaucoup quand la tempête fait rage. Les grandes vagues de l'ouragan du 20 février 1879 ont renversé en trois points les jetées du port de Lutry, et ont démoli les parois du talus du chemin de fer de Cully à St-Saphorin sur 57 endroits différents.

Quelle est la profondeur d'action utile des vagues dans le Léman? jusqu'à quelle profondeur les grandes vagues remuent-elles le sol du lac? Je répondrai à cette question dans le paragraphe où je vais traiter des rides du fond.

Comme les vagues solitaires, les vagues associées du vent se propagent au loin en avançant sur le lac; elles peuvent dépasser la région où le vent souffle et alors elles deviennent des vagues mortes, ou lames mortes. Souvent, à Morges, nous ne sommes avisés d'une vaudaire qui fait rage dans le Haut-lac, ou d'un coup de bornan qui a frappé dans la Grande-Conche, que par les lames mortes qui remuent le lac, une heure ou deux peut-être après l'apparition ou même la disparition du vent. La rotondité de la terre nous a empêchés de voir à l'horizon la ligne bleue du coup de vent, et les lames mortes arrivent seules jusqu'à nous.

J'ajouterai quelques observations et remarques sur les vagues.

a L'adage populaire : « Petite pluie abat grand vent », exprime un fait facile à vérifier, c'est que, sous l'action de la pluie, les vagues du vent diminuent rapidement de hauteur. « La pluie abat les vagues », telle serait la formule exacte. M. Osborne Reynolds [1] attribue cet effet

[1] Phil. soc. of Manchester. Nature, XI, 279. London, 1875.

au vortex annulaire qui traverse l'eau au-dessous du point où la goutte a frappé, et qui descend (cela est facile à voir en laissant tomber une goutte d'encre dans de l'eau claire) jusqu'à une fort grande profondeur, 40 à 50^{cm}. Sans me refuser à accorder au vortex une action positive, il me paraît que les vagues circulaires, déterminées par chaque goutte de pluie, doivent avoir un effet encore plus puissant. Ces vagues circulaires s'entrecroisent dans tous les sens, se coupent dans toutes les directions, et doivent troubler et annuler l'oscillation régulière et orientée des molécules d'eau mises en mouvemenl par les vagues du vent.

Du reste, c'est un fait constant : deux vagues, ou deux systèmes de vagues, ou deux types de vagues, peuvent interférer pendant un certain temps, et se superposer avec leurs caractères propres. Mais cette coexistence ne dure pas longtemps ; l'un des deux systèmes des vagues finit par éteindre l'autre. Ainsi la vague des bateaux à vapeur qui se propage si loin par un temps calme, disparaît bientôt si le lac est agité par les vagues du vent.

Dans des proportions encore plus grandes, nous croyons avoir constaté que la présence de vibrations du lac tendrait à éteindre le mouvement des seiches (v. p. 223).

b Nous avons vu que les vagues passant dans une eau moins profonde ont leur hauteur relevée, en même temps que leur longueur et leur vitesse sont diminuées. Sur un haut-fond et dans les eaux littorales, les vagues sont plus courtes et plus hautes ; on dirait que ce que les vagues perdent en longueur, elles le regagnent en hauteur. Il semble donc que le haut-fond n'ait pas d'influence sur la grandeur effective des vagues. Cela n'est vrai que pour les vagues développées.

Pour celles-ci le haut-fond agit seulement en déformant la vague ; pour les vagues en croissance, pour les vagues non développées, le manque de profondeur de l'eau est un obstacle à leur développement. Les vagues ne prennent pas leurs dimensions normales dans une eau peu profonde. Dans les lagunes de Venise, les plus fortes bises soulèvent des vagues qui ne dépassent pas celles d'un de nos petits rebats.

Il en résulte que l'effet de la beine sur les vagues est différent suivant le côté du lac où on le considère. La beine sur le vent restreint le développement des vagues qui ne prennent leurs dimensions normales que lorsqu'elles arrivent à l'eau bleue, à l'eau profonde. La beine sous le vent, au contraire, ralentit le mouvement des grandes vagues qui arrivent

du large, les resserre, mais d'une autre part en exagère tellement la hauteur qu'elles roulent et se brisent en écumant sur elles-mêmes.

c Il semblerait que la réflexion d'une vague contre un mur n'en affecte nullement la grandeur ; quand on voit le ressac des vagues qui s'entrecroisent en se quadrillant devant un quai, ou mieux encore, quand on voit se réfléchir contre ce quai la vague solitaire du bateau à vapeur, il semble que la vague est aussi haute après sa réflexion qu'avant ; oui, il semble même qu'elle ait gagné en hauteur, en rebondissant contre la paroi où elle est allée battre.

Et cependant, le mouvement des vagues s'éteint par les réflexions contre les rives et par les frottements sur le sol. Depuis mon enfance, je suis frappé des allures différentes, au point de vue des vagues, des deux parties du Léman que nous appelons le Grand et le Petit-lac. Dans le Grand-lac un calme plat est chose rare, dans le Petit-lac, chose fréquente. Une tempête a sévi sur le Grand-lac ; c'est pendant un ou deux jours que l'eau continue à être en mouvement, et les grandes lames de houle morte paraissent vraiment ne jamais s'éteindre ; il est un état du lac que j'inscris sur mes notes par les mots : « après l'orage », qui est très caractéristique. Une tempête a frappé le Petit-lac ; quelques heures après, le lac peut être au calme plat.

Pendant longtemps j'ai attribué cette différence d'allures à la différence de profondeur des deux bassins ; les frottements sur le sol atténuent et éteignent certainement le mouvement des vagues. Mais depuis que j'ai cru voir les mêmes allures du Petit-lac, qui revient si vite au calme plat, observables dans les grands lacs d'Insubrie qui sont plus profonds que le Léman, je suis obligé d'attribuer une part plus grande de cette extinction des vagues à l'étroitesse du bassin.

Que ce soit par la réflexion des vagues sur les murs du rivage, ou par les frottements sur les parties peu profondes du littoral, ou par le défaut de développement ensuite de la brièveté du chemin parcouru par les vagues sur un lac étroit et contourné, le fait est que dans les petits lacs, les lacs peu profonds, les lacs étroits, le calme plat est beaucoup plus fréquent que dans la vaste étendue du Grand-lac, aussi bien du Léman que du Bodan. Cet effet de la grandeur du bassin est encore bien plus frappant sur l'Océan. Le Marseillais a beau dire : « Té ! Cette mer, elle est comme d'huile », il y a toujours, même sur la mer, qui semble plate comme un miroir, une houle qui vient

battre la grève, et qui révèle de vieilles vagues, parties on ne sait quand, on ne sait d'où.

d Les vagues, en roulant les unes sur les autres, font un bruit très fort. On entend leurs coups lorsqu'elles battent sur la grève ou contre un mur; leur choc résonne fort loin. Mais en plein lac même, leur vacarme est encore très marqué. Lorsque l'on navigue en bateau en temps de vagues, on ne distingue pas trop ce bruit au milieu des sifflements du vent dans les cordages, des chocs des vagues contre le corps du navire, etc. En revanche, on le discerne fort bien lorsqu'un coup de vent frappe sur le lac à distance, avant que soit le vent, soit les vagues aient eu le temps d'arriver jusqu'à nous. Pendant longtemps l'on peut être étonné de ce bruit étrange, mystérieux, qui rompt le silence de la nuit. Je l'ai souvent entendu de Morges; il est surtout bien marqué à Montreux, lorsque la vaudaire fait rage en plein lac, en laissant en repos et dans le calme la côte et le rivage.

e Tantôt les vagues accumulent les graviers et sables sur la grève; tantôt elles dénudent celle-ci. L'effet change chaque fois, et rien n'est plus variable que l'état d'une grève soumise au caprice des flots. Pendant longtemps j'ai noté, après chaque tempête, les effets des vagues sur la grève, mais j'avoue n'avoir pas réussi à démêler les lois de ce phénomène; le même vent, les mêmes vagues, avec la même force apparente, un jour, accumulaient les matériaux au pied du mur de mon jardin, l'autre jour, le déchaussaient et le dénudaient. Ces différences d'action proviennent soit de la grandeur des vagues, soit de leur direction, soit de leurs allures, soit probablement aussi de la hauteur relative des eaux du lac; mais de quelle manière? je l'ignore.

2° *Les taches d'huile.*

Les riverains du Léman désignent sous le nom de *fontaines* des taches irrégulières qui apparaissent à la surface du lac, lorsque celui-ci est ridé par une brise légère. Ce phénomène a donné lieu à beaucoup de théories et de suppositions que je crois erronées; voici l'interprétation que j'en ai donnée [1] :

Si l'on approche d'une fontaine, l'on constate immédiatement que

[1] Bull. S. V. S. N., XI, 148. Lausanne, 1873.

la différence de couleur qui a frappé l'œil à distance est due à une modification dans la forme des vagues ou rides. Partout où le lac a sa couleur normale, d'un bleu plus ou moins foncé suivant la pureté de l'eau, l'éclat du ciel, la grandeur et la direction des vagues, l'incidence du rayon visuel, etc., les vagues ou rides que soulève la brise sont vives et aiguës ; la ligne qui joint leurs deux faces, dont l'une au moins est concave, forme une arête, un angle plus ou moins obtus, suivant la grandeur de la vague et l'intensité du vent. Au contraire, dans la fontaine, les vagues et les rides sont mortes, leurs sommets sont arrondis et à faces convexes, et elles ne présentent jamais d'arête anguleuse à leur faîte. Si les vagues ont des dimensions un peu fortes, elles ne montrent pas, dans la fontaine, les rides secondaires qui guillochent normalement les vagues vives. Si la brise est très faible et les vagues très peu élevées, il peut même se faire que les rides manquent absolument sur la fontaine qui est alors plate comme un miroir.

Les bords des fontaines sont bien limités ; c'est suivant une ligne presque franche que la surface du lac change de caractère, et que les vagues deviennent mortes ou vives.

La forme des fontaines varie et a quelque chose d'inconstant et de fort irrégulier. C'est tantôt une tache, une surface circulaire, ovalaire ou de forme quelconque ; tantôt, et c'est le cas le plus fréquent, la fontaine, qui prend alors le nom de chemin dans la langue des riverains, a la forme d'une bande très allongée, de cinq à dix mètres de largeur, serpentant, s'infléchissant très lentement en courbes arrondies ; c'est un grand chemin, une large route tracée par une main invisible sur la surface du lac. Si nous en suivons le trajet, nous la verrons aboutir à un point bien défini de la côte, et ce point d'origine que nous noterons, est le plus souvent l'orifice d'un égoût ou un établissement de blanchisseuse. D'autre fois un chemin marquera, pendant des heures peut-être, le passage d'un bateau à vapeur. D'autre fois une large fontaine s'étendra le long des jardins d'une ville, et arrêtera, devant Morges par exemple, à cinquante mètres du bord, les vaguelettes d'un rebat soufflant du large.

Vues à distance, d'un point élevé, de Lausanne par exemple, ces larges bandes, ces taches capricieuses, marquent singulièrement sur le beau moiré azuré du lac, et leur forme changeante et inconstante a souvent intrigué les observateurs.

Diverses explications ont cours dans le public sur ce phénomène naturel. Voici celles que j'ai pu recueillir :

Selon les uns, la cause en est due à des sources sous-lacustres qui viennent émerger à la surface ; de là sans doute le nom de fontaines. L'inconstance et la mobilité de ces taches réfutent immédiatement cette opinion ; il n'existe du reste, nous l'avons déjà dit, à la connaissance des pêcheurs, aucune source sous-lacustre un peu importante dans le Léman.

Selon les autres [1], ce sont les couches profondes, chaudes, du lac, qui viennent monter à la surface, à des places déterminées. Il est vrai qu'en automne et en hiver, alors que l'air est plus froid que l'eau, les couches superficielles du lac, refroidies par le contact de l'air, augmentent de densité et tombent dans les profondeurs pour aller chercher un niveau, dont la température et par suite la densité soient égales à la leur ; il est vrai aussi qu'à ce moment les couches profondes doivent monter pour remplacer ces couches superficielles et que des courants ascendants émergent peut-être à des places limitées. Mais le phénomène des fontaines ayant lieu dans toutes les saisons de l'année, cette explication qui ne se rapporterait qu'aux mois d'automne et d'hiver n'est pas suffisante.

Selon d'autres, ce sont des courants d'air obliques ou verticaux qui tombent sur la surface du lac, suivant un angle plus ou moins ouvert. J'avoue ne pas comprendre cette explication et je n'en entreprends pas la réfutation.

Selon d'autres, la fontaine aurait lieu sur un point où le courant d'air du vent se relèverait légèrement et cesserait de venir caresser la surface du lac. C'est là l'allégation d'un fait, ce n'en est pas une explication ; car il faudrait encore donner la raison du soulèvement du vent, indiquer pourquoi, à certains points, le vent se relèverait sans cause appréciable et ne se comporterait pas sur les fontaines, comme partout ailleurs à la surface du lac. Le fait est du reste faux, c'est ce qu'il est facile de démontrer en faisant naviguer à travers une fontaine un jouet d'enfant, une petite barque en bois, avec une voile aussi basse que possible, de un ou deux centimètres au plus de hauteur ; le petit navire continuera sa course au travers des fontaines, aussi facilement

[1] *R. Blanchet.* Essai sur l'histoire naturelle des environs de Vevey. p. 51. Vevey, 1843.

et aussi vite qu'il naviguait auparavant sur la surface vive du lac.

Selon d'autres [1], la fontaine est due à l'immobilité absolue de la colonne atmosphérique qui lui est superposée, tandis que tout autour l'air est agité ou en mouvement.

Selon d'autres enfin, et c'est l'explication dont on a nourri mon jeune âge, la fontaine se produirait au point de rencontre ou de divergence de deux courants d'air dont la direction est légèrement différente. Cette interprétation n'est pas meilleure que les autres, car si les vents convergeaient, nous aurions suivant leur ligne de rencontre une véritable barre et les vagues des deux courants d'air quadrilleraient leurs crêtes ; d'un autre côté si les vents divergeaient ils laisseraient entre eux un espace calme de forme triangulaire, s'élargissant d'autant plus que les courants d'air seraient plus éloignés. La forme et la direction des fontaines n'a du reste aucun rapport avec la direction du vent et l'on observe souvent des chemins dont le grand axe est parallèle à la crête des vagues.

Avant de donner l'explication que je crois la véritable, je dois décrire un phénomène tout à fait analogue qui se produit dans de tout autres circonstances. Lorsqu'il pleut et que le lac est calme et plat comme un miroir, l'on observe à sa surface des taches blanches sur fond grisâtre, qui rappellent les fontaines décrites plus haut. Leur forme, leur irrégularité, leur variabilité, sont absolument comparables à celles des fontaines. Si l'on étudie la cause du changement de couleur du lac, l'on reconnaît bientôt qu'il est dû à la manière différente dont se comportent les gouttes de pluie dans les fontaines et en dehors d'elles. La goutte de pluie, en frappant la surface du lac, détermine la production de vagues circulaires, dont l'élévation dépend de la grosseur de la goutte, et qui s'étendent, plus ou moins loin, en cercles concentriques de moins en moins apparents, jusqu'à ce qu'elles finissent par s'éteindre et mourir. Ces vaguelettes se croisent et s'entrecroisent dans tous les sens et donnent à la surface du lac cette teinte grise que l'on connaît. Or, dans la fontaine ce guilloché n'existe pas ; la goutte en tombant dans l'eau détermine bien la formation d'une onde, mais cette onde s'étend peu et meurt très vite. Dans la fontaine, les vaguelettes circulaires s'éteignent fort rapidement, ne

[1] *Vaucher*. Mémoires sur les seiches [loc. cit. p. 43], p. 92.

s'entrecroisent plus, et le miroir du lac n'est pas ou n'est que très peu ondulé. Il semblerait vraiment qu'il pleut dans un lac d'huile.

C'est en effet le cas : les chemins, les fontaines, qu'elles s'observent sur le lac ridé par le vent, ou par un temps de pluie, sont des taches d'huile et c'est sous ce nom que nous les désignerons désormais. Une couche extrêmement mince de substance grasse se répand à la superficie de l'eau et transforme la surface aqueuse en une surface huileuse.

Sur une couche huileuse, le vent ne détermine que des vagues mortes, la goutte d'eau ne produit que des ondes presqu'aussitôt éteintes. C'est ce que nous prouverons par les observations et les expériences suivantes :

1° Si je suis avec attention la petite barque d'enfant que je fais naviguer à travers une fontaine, comme je l'ai dit plus haut, je constate qu'elle pousse devant elle une couche très mince, adhérente au corps solide, qui se détache en lames ou en écailles plus ou moins larges. Il y a donc sur la fontaine une couche différente de la surface naturelle de l'eau.

2° Les poussières et petits corps flottants sont accumulés en grand nombre à la surface des fontaines. Ils semblent y être retenus par une couche visqueuse et adhérente. Si l'on m'objectait que ces poussières et corps flottants pourraient être par eux-mêmes la cause de la fontaine, je répondrais par l'expérience suivante. J'ai versé à la surface de l'eau quelques litres de poussières fines, par un jour de brise légère et j'ai constaté facilement que ces poussières s'étalent très lentement à la surface de l'eau et qu'elles ne provoquent aucunement la formation d'une fontaine.

3° Dans certains cas favorables, j'ai pu constater à la surface des fontaines la formation de cercles irisés, qui prouvent l'existence d'une pellicule extrêmement mince de pouvoir réfringent différent de celui de l'eau.

4° Si par un jour de soleil, lorsque l'eau est pure, en un point où l'eau n'a pas plus de cinquante centimètres de profondeur, je laisse tomber dans l'eau une pierre grosse comme le poing, ou si je verse subitement une certaine masse d'eau, un litre environ, je détermine un trou à la surface de l'eau ; la couche grasse qui forme la fontaine est écartée et refoulée violemment en dehors. Quand l'eau agitée par le choc a repris son calme, je vois, sur le fond, l'ombre formée par les bords

de la couche huileuse qui se dessine comme un cercle sombre sur le fond éclairé ; ce cercle se rétrécit très rapidement, comme le ferait une substance élastique qui reviendrait sur elle-même, et en une seconde ou deux, au plus, il a disparu en s'évanouissant au centre.

5° Si je fais passer ma péniche à travers une fontaine, le corps du bateau entrant dans la fontaine entraîne derrière lui une masse d'eau propre qui empiète sur la couche huileuse ; quand le bateau sort de la fontaine, ses bords entrant dans l'eau pure entraînent de l'eau huileuse ; les rames enfin, qui ont frappé l'eau huileuse, emportent quelques gouttes du corps gras. Il en résulte que pendant quelques instants les contours de la fontaine sont déformés, et démontrent l'existence d'une pellicule de nature différente, entraînée par le bateau qui l'a traversée.

6° Le passage d'un bateau, au travers d'une fontaine, se reconnaît pendant fort longtemps aux bulles d'air que le choc des palettes ou des rames a développées sur cette eau savonneuse. Par un jour de beau soleil, on peut ainsi reconnaître à distance l'existence de très petites places, très morcelées, revêtues de leur couche huileuse.

7° L'expérience classique du camphre, que j'ai répétée plusieurs fois avec succès, m'a toujours montré les petits morceaux de camphre tournant et girant avec les allures connues à côté de la fontaine, tandis que dans la fontaine elle-même les poussières de camphre étaient parfaitement immobiles. Cette expérience démontre à la surface de l'eau la présence d'un corps gras.

8° L'origine des fontaines, quand elle peut être suivie, permet toujours de remonter à la source d'un corps huileux et gras. Elles viennent d'un égoût, d'une tannerie, d'un établissement de blanchisseuses ; elles marquent la trace d'un bateau à vapeur lorsque la cuisine s'est débarrassée des eaux grasses ou lorsque la pompe de cale a rejeté dans le lac l'eau salie par l'huile qui est tombée des machines. C'est ce que j'ai pu constater avec une grande précision, chaque fois que j'ai eu l'occasion de naviguer sur l'un de ces petits yachts à hélice qui servent à la chasse sur notre lac.

9° Enfin la preuve décisive est la production artificielle des fontaines à l'aide de quelques gouttes d'huile versées à la surface. Cette expérience, bien facile à répéter sur le lac, chaque fois qu'une brise légère en agitera la surface, ou qu'il pleuvra par un temps calme, convaincra les plus incrédules de la rapidité avec laquelle ces taches

d'huile s'étendent à la surface de l'eau. L'on pourra même appliquer le calcul à la production de ces fontaines et constater que 20 centimètres cubes d'huile suffisent à couvrir environ une surface de 4000 mètres carrés. La couche d'huile répandue ainsi sur le lac ne mesure guère que $\frac{1}{200\,000}$ e de millimètre d'épaisseur.

L'épaisseur de la lame d'huile étendue sur l'eau a été étudiée par beaucoup d'auteurs ; voici de la plus faible à la plus forte les valeurs, exprimées en millionièmes de millimètres ($\mu\mu$), que j'ai trouvées dans les expériences modernes.

Miss A. Pockels (1), huile d'olives	1.3 $\mu\mu$
Lord Rayleigh (2)	1.6
Röntgen (3)	1.8
F.-A. Forel	5
Amiral Cloué (4)	10
G. Quincke (5)	50
Overbeck (6)	53
Miss Pockels (1), essence de térébentine	93
Sohncke (7), huile de navets	94
» huile d'olives	111

Tous arrivent à des valeurs plus faibles qu'une demi longueur d'onde ($\lambda = 588\mu\mu$) ; l'épaisseur que m'a donnée l'expérience 5$\mu\mu$, ou un deux cent millième de millimètre, reste entre les extrêmes de ces auteurs ; quoique mon procédé d'évaluation fût assez grossier, il m'a amené à un chiffre probablement assez exact.

L'expérience suivante prouve du reste que l'épaisseur de la lame huileuse est plus faible que la demi-longueur d'onde lumineuse. Que

(1) On the relative contamination, etc. Nature XLVI, 418, London, 1892.

(2) Proc. R. Soc. XLVII, 364. London, 1890 (Naturw. Rundschau V, 478, 1890).

(3) Ueber die Dicke, etc. Annalen der Phys. XLI, 321. 1890 (Naturw. Rundschau VI, 48. 1891).

(4) Le filage de l'huile, p. 38. Paris, 1887.

(5) Ueber die Entfernung, etc. K. Ges. d. W. zu Göttingen, 5 mai 1869.

(6) Ann. de Phys. (Nature XLVIII. 181. London, 1893).

(7) Die schliessliche Dicke, etc. Annalen d. Phys. XL, 345. 1890. (Naturw. Rundschau, V, 423. 1870.)

l'on verse sur l'eau quelques grammes d'une huile, — l'expérience est superbe avec l'essence de térébentine, — on voit la tache d'huile présenter d'abord les iris brillants des anneaux colorés ; mais à mesure que la lame, en s'étendant, devient moins épaisse, les couleurs disparaissent et la tache d'huile n'est plus visible sur l'eau que par l'extinction des rides des vagues. A ce moment, la lame mince est moins épaisse qu'une demi-longueur d'onde lumineuse, et le phénomène des anneaux colorés ne peut plus se produire.

Je rappellerai à cet égard la pratique bien connue des pêcheurs de la Méditerranée, qui, lorsque la brise ride trop la surface de l'eau et les empêche de voir au fond les animaux qu'ils poursuivent, éteignent les vagues en jetant à la surface quelques gouttes d'huile.

Je suis donc fondé à interpréter la formation des fontaines, comme je l'ai dit, en les attribuant à la présence d'une couche très mince d'un corps gras répandu à la surface du lac ; j'ajouterai que, depuis l'époque où j'ai pour la première fois émis cette idée [1], j'ai suivi l'observation du phénomène chaque fois que j'en ai eu l'occasion, et que je n'ai jamais constaté un fait qui fût en opposition avec cette théorie.

Quant à la provenance des corps gras qui forment les taches d'huile, je puis indiquer, à côté des causes susmentionnées, les corps animaux ou végétaux en décomposition dont les parties grasses viennent, après la dissolution des tissus, monter à la surface de l'eau [2]. C'est là probablement l'origine des taches d'huile que l'on observe soit sur les eaux des marais, soit sur l'eau de la mer, soit sur l'eau des lacs de montagnes, où les produits gras de l'industrie humaine ne sauraient être invoqués.

En résumé, de toutes les expériences que j'ai relatées et de toutes les observations directes, dont je crois inutile de surcharger cette étude, je conclus que le changement d'aspect et de forme offert par les vagues du vent et de la pluie dans les taches irrégulières connues sur le Léman sous le nom de fontaines et chemins, et qui existent sur tous les lacs, mers et eaux dormantes, que ce changement d'aspect est dû à l'existence, à la surface de l'eau, d'une couche extrême-

[1] S. V. S. N., séance du 21 juillet 1869. Bull. t. X, p. 344.

[2] J'ai souvent vu une fontaine se développer sous le vent du cadavre d'un poisson en putréfaction, flottant à la surface de l'eau.

ment mince d'un corps gras, de consistance huileuse. Je propose de les appeler des taches d'huile.

L'on a souvent remarqué que les taches d'huile sont plus évidentes au moment où le temps va changer ; on les tient pour un signe précurseur du mauvais temps. Les premières bouffées du vent qui amène l'orage les dessinent en grande abondance sur le lac, et vue d'une hauteur, de Lausanne par exemple, la surface du Léman paraît alors toute diaprée de ces taches qui réfléchissent autrement que l'eau vive les couleurs du ciel et de la côte oposée. Au contraire, sur un lac agité par un grand vent, par la bise ou par le sudois, les taches d'huile sont relativement peu nombreuses. Voici l'explication du phénomène. Quand un grand vent souffle sur le lac, le courant d'air, en caressant la surface, entraîne les couches huileuses vers la côte sous le vent ; là, les vagues les brassant contre la rive, elles forment l'écume qui vient s'accumuler sur la grève. Le lac est ainsi nettoyé des taches d'huile. Au contraire, par le beau temps, les huiles, versées à la surface par les cent agents qui polluent le lac, restent le jouet des flots et des courants locaux ; elles demeurent en plein lac ; elles n'apparaissent pas, tant qu'il fait calme plat, et ne deviennent évidentes qu'aux premières risées du vent. Si au moment où l'orage s'approche, on voit les taches d'huile en plus grande abondance que jamais, c'est qu'en général l'orage succède au calme atmosphérique ; par les temps orageux, le jeu des brises locales est ordinairement interrompu.

On connaît le grand profit que les marins savent tirer de l'effet de l'huile répandue à la surface de l'eau pour apaiser localement les vagues de tempête. Je n'ai pas d'expérience utile à citer dans cet ordre de faits, lesquels, sur une plus grande échelle, sont conformes à tout ce que j'ai vu de l'extinction des ondulations par la lame mince de la couche huileuse.

3° *Les rides de fond.*

Il n'est pas de plus joli phénomène dans la physique naturelle des lacs que les *rides de fond* (Ripple marks des Anglais, Wellenfurchen des Allemands). Ces rides séparées par leurs sillons sont modelées dans le sable ; leur largeur d'une crête à l'autre est presque

uniforme, elles sont équidistantes ; elles marchent d'une manière générale en lignes parallèles, mais accidentellement, aux points d'inflexion en particulier, elles s'anastomosent ou se dédoublent sans rupture violente du type normal du dessin ; dans leurs lignes droites ou légèrement courbées, elles forment un guilloché simple, largement infléchi. Si j'avais à en donner une idée à quelqu'un qui ne les aurait jamais vues, je ne saurais mieux les comparer qu'aux stries de l'épiderme palmaire de la main humaine, dont elles ont les allures et la belle régularité.

Les rides se dessinent sur le sable du fond des eaux dormantes, et on les voit dans la région littorale des mers, des lacs et des étangs ; on les retrouve aussi sur le sable des fleuves dans des conditions favorables, quand le courant d'eau est assez large pour qu'il s'y développe des vagues.

Dès mes premières études sur le lac Léman, je les ai rencontrées ; je les ai observées de mon mieux et j'ai essayé de les expliquer (1). La théorie à laquelle j'arrivai alors faisait intervenir la pression verticale des vagues de l'eau sur le fond ; elle était insoutenable, je l'ai reconnu plus tard, et elle ne mérite pas d'être reproduite ici, même à titre d'exemple des erreurs d'imagination d'un naturaliste.

J'ai repris à plusieurs fois cette étude, en combinant l'observation des faits naturels et l'expérimentation artificielle. J'ai résumé devant la Société vaudoise des sciences naturelles, séances du 6 février et du 6 mars 1878, les résultats de ces recherches qui m'avaient assez bien rapproché du but (2).

En avril 1882, M. A.-R. Hunt a lu à la Société royale de Londres un intéressant travail sur ce sujet (3) ; il donne les dimensions des rides dessinées sur les côtes de la mer à Torquai, dans le Devonshire ; il réfute l'opinion assez généralement adoptée que les rides seraient dues à l'action de courants de direction constante ; soit par l'observation dans la nature, soit par l'expérimentation dans des bassins artificiels, il a reconnu, comme moi, que les rides sont causées par le

(1) Soc. vaud. sc. nat., séance du 16 février 1870.

(2) Bull. S. V. S. N., p. 66 et 76, P. V. Lausanne, 1878.

(3) *Arthur Roope Hunt*, On the formation of ripplemark. Proc. of. the R. Soc., XXXIV, 1. London, 1882.

balancement alternatif de l'eau, balancement qui n'est qu'une modification dans la profondeur du mouvement superficiel plus compliqué des vagues d'oscillation progressive. Enfin, M. Hunt a cherché à déterminer la limite d'action des vagues dans la profondeur de la mer.

En mars 1883, M. Casimir de Candolle a publié dans les *Archives de Genève* un important mémoire sur les rides de fond [1]; il y décrit une foule d'expériences intéressantes, et en tire des déductions fort ingénieuses ; il montre entre autres que la formation des rides n'a pas lieu seulement sur le sable dans l'eau en mouvement, mais qu'on peut les produire également dans d'autres liquides, ou sur des corps visqueux, goudron, sirop de groseilles, ou sur des corps plus légers que l'eau, poussières de bois, bulles d'air dans un flacon. Il a formulé dans les termes suivants sa loi de la formation des rides de fond : « lorsqu'une matière visqueuse, en contact avec un liquide moins visqueux qu'elle-même, éprouve un frottement oscillatoire ou intermittent, résultant du mouvement de la couche liquide qui la recouvre, ou de son propre déplacement relativement à cette couche, la surface de la matière visqueuse se ride perpendiculairement à la direction de ce frottement; l'intervalle compris entre les rides ainsi formées, autrement dit leur écartement, est en raison directe de l'amplitude du frottement. » Pour M. de Candolle, le sable soulevé par les mouvements des vagues constituerait avec l'eau une substance visqueuse, sur laquelle les rides se formeraient, comme, dans ses expériences, elles se forment sur du goudron. Quant à la théorie même de cette action, lorsque M. de Candolle dit : « que l'effet du frottement de l'eau sur la matière visqueuse est tout à fait identique à celui du frottement de l'air sur la surface libre d'un liquide non visqueux, il y développe des vagues, » il me semble s'écarter de la notion très juste qui est à la base de toute son étude ; il passe du frottement oscillatoire, qui est une action discontinue et de direction alternante, à l'action du vent sur l'eau qui est continue et de direction constante, et qui détermine des vagues d'oscillation progressive.

Ainsi donc MM. Hunt et de Candolle sont, comme moi-même en

[1] *C. de Candolle*, Rides formées à la surface du sable déposé au fond de l'eau. Archives de Genève, IX, 241. 1883.

1878, arrivés à attribuer la formation des rides de fond au balancement des eaux (courant alternatif de Hunt, frottement oscillatoire de Candolle). Mais pas plus que moi dans mes recherches antérieures, ils n'ont pu tirer de la constatation du fait son explication. (1)

Dans son mémoire lu à la Société royale de Londres, le 22 novembre 1883, M. G.-H. Darwin, tout en confirmant les observations et explications de M. de Candolle et de moi-même, a apporté un fait nouveau, très intéressant. Il a montré que, aussi bien dans la formation des dunes sous-aquatiques que dans celle des rides de fond, il se produit dans l'eau, au contact avec le sol, de petits tourbillons verticaux ascendants qui soulèvent le sable et le ramènent des deux faces vers le sommet de l'arête; qu'il n'y a pas seulement un mouvement de translation horizontale, mais que le phénomène est beaucoup plus compliqué. Il a fait cette démonstration en versant dans l'eau, mise en rotation ou en balancement dans ses auges, de petites gouttes d'encre qui prenaient bientôt la forme de champignons ou d'arbres, inclinés diversement, suivant le jeu des courants (2).

Je vais reprendre le sujet à ma manière, en essayant, non pas d'une théorie, le mot serait trop ambitieux, mais d'une description des faits

(1) Aux citations bibliographiques données par M. de Candolle, j'ajouterai les suivantes : *Siau* (Action des vagues à de grandes profondeurs. Ann. de chim. et phys., 3me série, II, 118. Paris, 1841) étudie la formation des rides de fond : « Les ondulations sont un effet de l'action des flots. Lorsque les eaux sont très agitées, toutes les matières sont mises en mouvement par elles ; peu à peu la vague diminue, son action s'amoindrit, et il arrive un moment où elle ne peut plus faire marcher les matières les plus lourdes. Alors il se fait un triage, une espèce de départ ; les matières légères se séparent, continuent d'avancer par ondulations, comme cela a toujours lieu, le flot agissant au fond des creux pour les porter au sommet, et laissant à nu les corps les plus pesants. » Siau a vu distinctement les rides de fond jusqu'à 20m de profondeur, et à l'aide d'une sonde ensuiffée, il en a reconnu les empreintes jusqu'à 188m de profondeur au N.-O. de la rade de Saint-Paul, près de Saint-Gilles, en Vendée.

Delesse (Lithologie du fond des mers, p. 110, 1871), dit que l'oscillation de la mer est démontrée jusqu'à 200m de profondeur dans l'Océan, et que cela est mis en évidence par les rides de fond. (Cité par Hunt.)

Dr A. Barthelemy, (Des vibrations communiquées aux nappes liquides de forme déterminée. Ann. de chim. et phys., 5me sér. I, 100. Paris, 1874), voit dans les rides du fond des lignes nodales de l'oscillation vibratoire des vagues.

John Gilmore, décrivant la plage des sables de Goodwin, signale incidemment des rides qui auraient deux ou trois pieds de hauteur. (Cité par Hunt.)

G.-H. Darwin (On the geological importance of the tides. Nature, XXV, 214 London, 1882), attribue la formation des rides de fond aux courants de la marée.

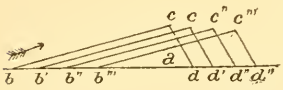
(2) *G.-H. Darwin*. Ripplemarks. Nature, XXIX, 162. London, 1883.

observés et d'une explication élémentaire du phénomène, telle que je j'ai donnée en 1883 (1).

En 1868, alors que j'étudiais les rides de fond dans le lac Léman, je ne trouvai dans les auteurs d'autre explication que celle donnée par Lyell (2), qui les confondait avec la formation des dunes. J'en ai profité pour observer attentivement les dunes qui se développaient sous l'eau dans le lit d'un bief de moulin, près de Morges ; le courant d'eau de ce bief marchait à la surface avec une vitesse de 40 centimètres par seconde.

Le sable arraché du fond par le courant s'écoule régulièrement avec l'eau ; il ne s'arrête que lorsqu'il arrive dans un remous, soit dans une dépression au-dessous du plan général du fond, soit derrière un obstacle saillant. Dans un tel remous, le sable, à l'abri du courant, se dépose en couches stratifiées.

Or que, par une action quelconque, une petite colline de sable, fig. 93 *a*, soit formée sur le fond de l'eau, le sable enlevé par érosion à sa face amont *b* sera transporté par-dessus la crête *c* jusqu'à sa face aval *cd* ; il y trouvera un remous, le remous que les expériences de Darwin ont si élégamment démontré, et il s'y déposera en formant un talus d'éboulement avec la pente naturelle de ce genre de déclivité. Cette action de transport se continuant dans le même sens, il se produira une dune, laquelle présente les caractères suivants :



(Fig. 93.) Coupe schématique de la dune d'un ruisseau.

1° La crête *c* de la dune se déplace lentement dans le sens du courant en *c' c'' c'''*, par le fait de l'adjonction de nouvelles couches *c'd'*, *c''d''*, etc, sur le talus d'éboulement de la face aval.

2° Les deux faces de la dune ont une inclinaison différente, la face amont, ou face d'érosion *bc* (vers le haut du courant), est presque horizontale ou faiblement inclinée; la face aval, ou face d'alluvion *cd*, vers le bas du courant) est très inclinée, suivant un talus d'éboulement naturel.

3° Une coupe verticale, dans l'intérieur de la dune, montrerait une

(1) *F.-A. Forel.* Les rides de fond étudiées dans le Léman. Archives de Genève, X, 39. 1883.

(2) *C. Lyell,* Manuel de géologie, trad. française, I, p. 33. 1856.

stratification inclinée, en plans parallèles au talus d'éboulement de la face d'alluvion. En même temps on y verrait une répartition des matériaux suivant leurs dimensions, les grains de sable les plus fins restant au haut de la pente, tandis que les grains les plus grossiers sont entraînés jusqu'au pied du talus.

Les mêmes actions se répétant aux mêmes places, si par le fait du relief du fond, une dune s'est développée à un point donné, il s'en formera une seconde au même endroit quand, par suite du déplacement normal de la dune, la première aura descendu le fil du courant. Il y aura donc formation d'une série de dunes semblables, équidistantes, se succédant de haut en bas du courant (fig. 94), les plus anciennes étant le plus bas dans le sens du courant.

(Fig. 94.) Coupe schématique d'une série de dunes de ruisseau. La flèche indique le sens du courant.

Les caractères que nous venons de trouver dans les dunes ne se constatent pas dans les rides de fond. Celles-ci sont immobiles et leur forme est fort différente.

Elles sont immobiles ; c'est un fait d'observation. Par une belle journée de printemps, en 1868, j'ai observé pendant trois heures de suite les rides de fond dessinées dans le lac sur un beau sol de sable, vers la côte de Préverenges, près Morges ; de jolies vagues d'un rebat assez vif, agitaient suffisamment le fond pour soulever le sable à chaque mouvement de l'eau. J'ai constaté que, pendant toute la durée de l'observation, malgré l'agitation du sable, il n'y avait pas le moindre déplacement des rides par rapport à des repères choisis dans le sol lui-même.

Quant à la forme des rides elle peut s'étudier :

a Par l'observation directe dans le lac quand l'eau est redevenue calme.

b Sur les grès des couches géologiques du sol, où elles sont souvent très bien reconnaissables.

c Sur des moulages analogues à ceux que j'ai levés en janvier 1869 sur le sable du lac lui-même. Pour cela j'ai fait un cadre à charnière en feuilles de ferblanc ; je l'ai descendu dans le lac sous une profondeur d'un mètre d'eau environ, en un point où les rides

étaient fort bien dessinées ; puis j'ai versé, à travers l'eau, une crême de plâtre très dilué, qui s'est pris sous l'eau et m'a donné un moule négatif. J'en ai tiré entre autres l'épreuve positive que j'ai déposée au musée de géologie de Lausanne.

On peut, par ces divers procédés, constater que, normalement, les rides de fond ont une coupe parfaitement symétrique de chaque côté, les deux talus ayant exactement la même inclinaison. Cette inclinaison des talus est d'autant plus forte que les rides sont plus fraîches, c'est-à-dire qu'il s'est écoulé moins de temps depuis le jour où les vagues les ont modelées. Avec le temps, en effet, les rides s'effacent ; par le travail en particulier des petits animaux qui vivent dans le sable, les creux se comblent, les arêtes s'aplatissent de plus en plus. La crête qui unit les deux talus devient mousse ; sur des rides très fraîches elle est plus vive, et formée par la rencontre de deux plans suivant un angle obtus (fig. 95).

(Fig. 95.) Coupe d'un moulage des rides de fond, pris dans le lac, sous un mètre d'eau. Demi grandeur naturelle.

La profondeur des sillons comparée à la largeur des rides, d'une crête à l'autre, semble à première vue plus considérable qu'elle n'est en réalité. Sur le moulage dont je viens de parler, pris en un point où les rides étaient fort bien marquées, j'ai pu mesurer les dimensions exactes, et constater que, pour une largeur de 6 centimètres d'une crête à l'autre, la profondeur du sillon au-dessous des crêtes n'était que d'un centimètre, (voir fig. 95, demi-grandeur naturelle).

Quant à la distribution des matériaux, l'arête et la partie supérieure des rides sont formées du sable le plus fin, le sable le plus grossier descendant au bas des talus et dans les sillons. (1)

Le 14 août 1875, les rides formées sur le sable du Rhône à Massongex, près de Bex, présentaient une apparence singulière ; les arêtes, très aiguës, étaient toutes noires, les talus et les sillons ayant le gris

(1) Si au lieu de considérer les rides fraîches, ou en voie de formation, on s'adresse à des rides anciennes dessinées depuis longtemps sur le sol du lac, on voit le fond des sillons rempli de poussières et de débris organiques, de feuilles, bois, coquilles, etc. Promenés sur le fond du lac par les courants, ces corps légers s'arrêtent et s'accumulent dans toutes les dépressions du sol. Ce remplissage du fond des sillons par les corps légers est évidemment un phénomène secondaire.

nacré du sablon du Rhône ; je supposai que la couleur noire était due à de l'humus ou terre en fine poussière, plus légère et plus fine encore que le sable minéral. Pour le vérifier, dans une anse ou les rides étaient parfaitement propres, je salis l'eau en y versant de la terre délayée, et au bout de quelques minutes, je vis les particules terreuses se localiser sur les arêtes des rides qu'elles coloraient en noir.

Ainsi donc, soit par leur forme symétrique à talus également inclinés des deux côtés de l'arête, soit par leur immobilité, les rides de fond se distinguent très nettement des dunes formées dans le sable par un courant continu. Ce n'est que dans la distribution des matériaux qu'on pourrait retrouver une certaine analogie entre les deux ordres de formation.

Comment se forment les rides de fond ?

On peut, dans des conditions favorables, étudier leur développement sur le sable du fond du lac. Pour cela il faut choisir une plage sableuse, submergée sous une couche d'eau de faible épaisseur, et l'observer quand l'eau est agitée par des vagues légères, régulières, non guillochées par les rides de la brise. (1)

On voit alors le mouvement de la vague se traduire au fond de l'eau par un balancement alternatif régulier, d'avant en arrière et d'arrière en avant ; l'eau, les poussières en suspension dans l'eau, les grains de la couche supérieure du sable subissent ce mouvement pendulaire, dont le rythme correspond à celui de la vague. Quand le fond de sable a été artificiellement aplani et les rides effacées, celles-ci ne tardent pas à se reformer sous l'action de ce mouvement de balancement ; quand le sable présente son modelé normal des rides, on voit les grains de sable et les poussières aquatiques être promenés alternativement d'un côté à l'autre de chaque ride, être enlevés au sillon d'une ride, passer par-dessus l'arête pour tomber dans le sillon de la ride voisine, d'où ils sont repris par le mouvement de retour de la vague et rapportés à leur place primitive. Les tourbillons verticaux ascendants, mis en évidence par les expériences de M. G.-H. Darwin, en soulevant les corps mobiles sur le sol, doivent faciliter leur dépla-

(1) En général les matières huileuses répandues à la surface de l'eau sont chassées à la rive par les brises soufflant du large ; elles éteignent les rides de l'eau, et permettent une observation très suffisante des détails du fond.

cement horizontal en les maintenant pour un instant en suspension dans le liquide.

Ce mouvement de balancement pendulaire de l'eau, au-dessous des vagues superficielles d'oscillation progressive, ressemble en plus d'un point à celui que subit le liquide dans un bassin, où il balance suivant une oscillation fixe uninodale (balancement simple de l'eau dans une cuvette). Il était tout indiqué de rechercher l'effet du mouvement de balancement de l'eau dans des bassins de petites dimensions, sur le fond desquels on étalerait une couche de sable fin. Dès mes premières expériences en 1868, j'ai reconnu la formation, sur le sable de ces bassins, de rides de fond analogues à celles du lac. Des moulages de plâtre m'ont prouvé l'identité absolue des phénomènes ; même forme des rides, égalité des deux talus, même distribution des grains de différentes grosseurs, même immobilité des rides qui ne se déplacent plus une fois établies. Cette identité étant évidente, j'ai essayé d'en profiter pour chercher les lois de la formation de ces rides. Pour cela j'ai employé des bassins de diverses grandeurs et des sables de diverses grosseurs. Je vais donner le résultat des expériences que j'ai faites à ce sujet, soit en 1868, soit en 1877 et 1878.

Le mouvement de balancement de l'eau, tel qu'on l'obtient dans une cuve où on laisse l'eau balancer librement, est constitué essentiellement dans la partie médiane de la cuve, où les rides se dessinent le mieux, par un déplacement horizontal du liquide qui se transporte dans un mouvement d'ensemble, alternativement vers l'une et vers l'autre extrémité du bassin. Dans ce balancement pendulaire, il y aurait à considérer, pour l'étude qui nous occupe :

a L'amplitude de l'oscillation, c'est-à-dire le trajet parcouru par la molécule d'eau dans chaque mouvement (demi-oscillation).

b La durée de l'oscillation, c'est-à-dire le temps qu'emploie la molécule d'eau pour revenir à sa place, après avoir accompli une oscillation complète.

c La vitesse des courants d'eau, qui est le quotient de ces deux valeurs.

Je n'ai pas pu toujours, dans les expériences que je vais analyser, séparer suffisamment ces trois facteurs, mais nous arriverons, je l'espère, dans la suite de cette étude, à démêler assez bien leur action différente. Voici donc le résultat de mes expériences :

I. Avec le même sable j'obtiens des rides de même largeur dans des

bassins de différentes longueurs (entre 0.5m et 1.3m de longueur). La longueur du bassin n'a pas d'influence évidente sur la largeur des rides.

II. Dans un même bassin et avec le même sable, je vois la largeur des rides diminuer à mesure que la profondeur d'eau augmente. Voici les chiffres d'une série d'expériences, dans un bassin de 1.25m de long, la profondeur s'appréciant par la durée de la vague de balancement. (1)

	Durée de la vague.	*Largeur des rides.*
Eau peu profonde	2.6 secondes	5 centimètres
	2.3 »	4 »
	2.2 »	4 »
	2.1 »	3.7 »
	2.0 »	3.5 »
	1.9 »	3.5 »
Eau plus profonde	1.8 »	3.2 »

Cette série d'expériences donne un résultat très évident mais difficile à interpréter ; en effet, plusieurs facteurs varient en même temps. A mesure que la profondeur d'eau augmente, il y a diminution de la durée de la vague de balancement, et diminution de l'amplitude du balancement (soit du déplacement horizontal de l'eau dans chaque oscillation). Est-ce la profondeur de l'eau, est-ce la durée de la vague, est-ce l'amplitude du balancement de l'eau qui détermine la largeur des rides? Cela ne se voit pas immédiatement dans les résultats de cette expérience.

III. Dans un même bassin et dans les mêmes conditions de profondeur d'eau et de balancement, je vois la largeur des rides augmenter à mesure que je prends du sable plus grossier. C'est ainsi que j'ai obtenu des rides de :

39 millim.	de largeur	avec du sable	très fin,
51	»	»	moyen,
76	»	»	très grossier.

Grâce à l'obligeance de M. de Candolle, je suis en mesure de confirmer définitivement ce point ; il a bien voulu m'autoriser à utiliser

(1) Ainsi que nous l'avons vu au chapitre des seiches (p. 79), la durée de la vague de balancement uninodale est proportionnelle à la longueur du bassin, et inversement proportionnelle à la racine carrée de la profondeur.

l'excellent appareil qu'il a décrit à la fig. 1, pl. VI de son mémoire, sa cuve oscillante qui permet de limiter d'une manière très sûre l'amplitude du balancement de l'eau. Le 14 juin 1883, nous avons répété avec M. de Candolle les expériences qui démontrent l'effet de la grosseur du sable sur la largeur des rides, en ayant soin d'employer toujours la même profondeur d'eau et la même amplitude de balancement. En faisant passer sur un tamis le sable, nous le séparions en deux lots, dont les grains étaient de grosseurs différentes. Voici les résultats de deux séries d'expériences comparatives :

Sable du Léman, grève de Morges :

Sable fin, largeur des rides, 45^{mm}.
Sable grossier, largeur des rides, 57^{mm}.

Sable siliceux (acide silicique) :

Sable très fin, poussière impalpable, largeur des rides, 25^{mm}.
Sable fin, largeur des rides, 36^{mm}.

IV. L'amplitude du balancement n'a pas d'influence sur la largeur des rides, une fois formées. Lorsque dans un bassin j'ai obtenu des rides de fond, si je laisse le balancement de l'eau s'arrêter lentement, je vois les rides du sable ne pas changer de largeur, ne pas se déplacer, alors même que l'amplitude du balancement décroît progressivement.

Cela semble en contradiction avec la loi de M. de Candolle : la largeur des rides est en raison directe de l'amplitude du frottement. Je n'ai pas d'objection à faire à l'idée fondamentale de cette loi ; les expériences que M. de Candolle a répétées en ma présence m'ont convaincu de sa justesse. Mais pour écarter la contradiction apparente que je viens de signaler, je dois modifier un peu la forme de la loi de M. de Candolle et dire :

a Avec le même sable, dans le même bassin et par la même profondeur d'eau, la largeur des rides dépend de l'amplitude du balancement au moment de leur établissement.

b Les rides, une fois formées, ayant une largeur donnée, le décroissement d'amplitude du balancement n'a plus d'influence sur leur position et n'agit plus sur leur largeur.

Nous verrons plus loin que ce n'est pas seulement l'amplitude du

balancement de l'eau, mais encore la vitesse des courants de balancement qui déterminent la largeur des rides; si l'amplitude étant la même, la vitesse était plus lente (dans un bassin plus long, par exemple), les rides seraient moins larges.

V. La vitesse des courants de balancement de l'eau a de l'influence non seulement sur la largeur des rides, mais encore sur la possibilité même de leur établissement. Lorsque les mouvements de l'eau sont trop lents, les courants de balancement ne peuvent pas soulever le sable, et il ne se produit pas de rides. Lorsqu'ils sont trop violents, trop tumultueux, le sable tout entier est soulevé par l'eau, et, arraché du fond, il ne s'amoncelle pas en rides. Nous voyons ce dernier fait dans nos bassins à expériences, lorsque nous choisissons un sable trop fin qui reste en suspension dans l'eau en y formant des nuages, ou bien des poussières organiques trop légères ; les uns et les autres ne se déposent en rides que, lorsque le mouvement de balancement de l'eau se calmant, les corps en suspension descendent sur le fond, où ils sont promenés par le balancement alternatif et amoncelés en rides parallèles.

Les rides ne se forment donc que lorsque les courants de balancement ont une intensité moyenne, qu'ils ne sont ni trop forts ni trop faibles, étant données la grosseur et la densité du sable à mettre en mouvement ; plus le sable est lourd et grossier, plus les courants doivent être violents pour développer la formation des rides.

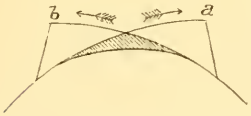
Les rides de fond s'établissant ainsi dans une eau soumise à un mouvement d'oscillation fixe, la première idée qui se présente à l'esprit est de chercher l'existence de nœuds dans le mouvement du balancement, quelque chose d'analogue aux ventres et nœuds qui se développent sur une plaque en vibration, dans les figures dites de Chladni. Mais cette interprétation se réfute facilement par l'expérience suivante :

Dans une cuve où je détermine la formation des rides de fond en faisant balancer l'eau sur du sable fin, je dessine avec un crayon, sur le fond du bassin, la position exacte des sillons qui séparent les rides. Puis j'efface les rides et je répète l'expérience à diverses reprises, en employant chaque fois un crayon de couleur différente pour figurer le dessin des sillons. J'enlève alors l'eau et le sable et je constate que la position des sillons a varié d'une fois à l'autre ; qu'il n'y a rien de fixe

dans cette position ; que tantôt c'est une ride, tantôt c'est un sillon qui occupe un point donné sur le fond du vase. Il n'y a donc pas là la fixité absolue, caractéristique de la position des nœuds et ventres des mouvements d'oscillation fixe. Là n'est donc pas l'explication du phénomène.

Une observation fortuite m'a mis sur la voie de l'explication qui me semble satisfaisante et que je vais développer ici. Le 23 mai 1883, je réfléchissais au très intéressant mémoire de M. C. de Candolle et aux jolies expériences dont il a illustré l'histoire des rides de fond, lorsque je vis de nouveau un fait que j'avais déjà noté le 16 novembre 1878. Un tuyau cylindrique de ferblanc, de 12 centimètres de diamètre, reposait sur le fond de l'eau, dans le lac, devant mon jardin. Sur toute la longueur de ce tuyau, était couché un petit bourrelet de sable, parfaitement régulier, à arête obtuse parallèle à la longueur du cylindre (je le donne en coupe dans la figure 96). C'était évidemment une ride de fond ; mais dans quelle condition étrange ! En étudiant de plus près cette apparition, je reconnus que la ride était en formation continuelle ; que chacune des vagues de l'eau la déformait en transportant l'arête, tantôt un peu plus en avant, tantôt un peu plus en arrière (voyez fig. 97). Lorsque, dans ses mouvements alternatifs, le courant d'eau de la vague transportait le sable d'avant en arrière, il enlevait une partie du sable sur la face antérieure de la ride, l'amenait par-dessus la crête, puis le laissait retomber en talus naturel dans le remous formé derrière cette crête ; il y avait, à ce moment, production d'une petite dune, à talus aplati sur la face antérieure, à talus incliné sur la face postérieure, et à arête se déplaçant d'avant en arrière (fig. 97 *a*) ; lorsque dans son mouvement de retour le courant d'eau marchait d'arrière en avant, le transport du sable avait lieu en sens inverse, et la dune se déplaçait dans le sens du nouveau courant, d'arrière en avant (fig. 97 *b*).

(Fig. 96.) Une ride de sable sur un tuyau.



(Fig. 97.) Formation de la ride sur le tuyau.

La ride de sable établie sur notre tuyau était donc constituée par la superposition de deux dunes, formées alternativement par les courants en sens inverse qui balançaient au fond de l'eau.

Comment au début le sable avait-il été porté sur le tuyau ? Evidem-

ment par une action analogue à celle de l'établissement des dunes. Les grains de sable soulevés par les courants de balancement des vagues ont été portés les uns après les autres jusqu'à la hauteur du replat du cylindre ; ils sont tombés dans le remous développé derrière la partie saillante du tuyau, et dans ce lieu de repos, ils ont attendu que le courant de retour les ramenât de l'autre côté de l'arête. Et ainsi de suite, les grains se sont accumulés, amoncelés, jusqu'à ce que la ride ait été formée.

J'ai vérifié la justesse de cette interprétation en reproduisant le phénomène dans une cuve à expériences ; j'ai placé sur le sable un cylindre de fer de 2 centimètres de diamètre, et j'ai bientôt vu s'établir sur son sommet une ride de sable formée par le procédé que je viens de décrire.

Supposons donc sur le sable du fond de l'eau une série de cylindres parallèles saillants, il s'établira sur chacun d'eux une ride de sable ; ces rides augmenteront de hauteur jusqu'à former les rides très aiguës et très élevées que nous connaissons dans la nature. Et, en réalité, lorsque j'observe les mouvements du sable sur une ride déjà formée, je le vois se transporter des deux côtés de l'arête en constituant, comme sur mon tuyau de ferblanc, une dune qui, dans les mouvements alternatifs de l'eau, se déplace alternativement d'un côté à l'autre du centre de figure de la ride.

Voilà donc comment les rides se maintiennent et augmentent de hauteur. Mais comment apparaissent-elles ?

Pour le rechercher, étalons dans une cuve à expériences un fond de sable parfaitement égal et uni ; puis plaçons-y un obstacle quelconque. J'ai choisi un fil de plomb de 3^{mm} de diamètre, je l'ai posé sur le sable, transversalement à la longueur du bassin, et j'ai fait balancer l'eau. L'obstacle a été de suite le point de départ d'un système de rides. Le sable, transporté par les courants alternatifs de l'eau, s'est accumulé sous forme de dune, tantôt devant, tantôt derrière cette crête immobile, et le fil de plomb a servi d'axe à une première ride ; les matériaux de cette ride ont été pris dans le sable immédiatement avoisinant, et la ride médiane a bientôt été limitée par deux sillons parallèles, l'un en avant, l'autre en arrière ; bientôt après se sont développées, de chaque côté, une ride externe à chacun de ces sillons, puis un nouveau sillon, puis une nouvelle ride, et ainsi de

suite. Tout le système des rides s'est ainsi établi successivement dans le sable, en partant de l'obstacle artificiellement placé.

Mais n'était-ce pas un fait accidentel ? N'y avait-il pas là simple coïncidence fortuite ? — J'ai détruit les rides ainsi formées, et j'ai déplacé le fil de plomb en le posant là où, dans l'expérience précédente, il y avait un sillon ; le système des rides s'est reformé comme précédemment, la première ride ayant pour axe la tige de plomb, et étant ainsi située précisément là où, dans le cas précédent, il y avait un sillon. Tout le système des rides avait donc été déplacé de l'espace d'une demi-largeur de ride.

Une autre vérification du fait que l'obstacle est bien l'origine et le point de départ du système des rides, c'est qu'en faisant obliquer la tige de plomb, je puis faire obliquer dans le même sens et de la même valeur toutes les rides qui restent parallèles à la première ride et par conséquent à l'obstacle.

Un obstacle quelconque placé dans le sable est donc l'origine du système des rides, dont la direction et la position sont sous la dépendance immédiate de la position et de la direction de l'obstacle.

Ce n'est pas seulement par un obstacle saillant que l'on détermine ainsi la position et la direction des rides dans un bassin à expériences ; un creux tracé dans le sable amène au même résultat. Seulement, dans ce cas, la base du système des rides n'est pas une ride limitée par deux sillons, mais un sillon limité par deux rides. Les choses se passent dans ce cas exactement comme avec l'obstacle saillant de la tige de plomb. Il n'est pas du reste besoin que le creux soit bien profond : le sillon tracé par mon doigt, ou même par la pointe d'un crayon, suffit parfaitement pour déterminer la forme, la direction et la position du système des rides. L'expérience est très jolie et fort concluante.

Cette expérience nous montre la raison d'être de la loi qui relie la largeur des rides avec l'amplitude du mouvement de balancement de l'eau. Quand notre fond de sable est bien uni et égal, les grains les plus superficiels sont tous transportés à la fois, sur toute la surface, par les courants alternatifs de l'eau. Ce qu'on peut appeler la couche mobile du sable se déplace, par mouvement d'ensemble, d'une même longueur que nous désignerons par la lettre l. Dans un premier temps, elle est portée en avant de cette longueur l, dans un second temps elle est ramenée en arrière de la même

longueur ; s'il n'y avait pas d'obstacle, de remous à la surface du sable, à la fin du second temps, toute la couche mobile aurait repris sa place primitive. Mais par le fait de l'obstacle posé au milieu de notre plaine de sable, tous les grains qui, avant le premier temps, étaient situés derrière cet obstacle, jusqu'à une distance égale à l, étant transportés par-dessus l'obstacle, tomberont dans le remous causé par sa saillie et seront immobilisés ; quand, dans le second temps, le courant de retour ramènera en arrière toute la couche mobile du sable, une partie restera, celle qui est arrêtée par l'obstacle. Il y aura donc déficit de matière ; à la fin du courant de retour, il y aura formation d'un sillon, et ce sillon aura la largeur l. Ce sillon, à son tour, sera l'occasion de la formation d'une ride, dont la largeur sera de même égale à l, étant formée dans des circonstances analogues ; et ainsi de suite. Ainsi s'expliquent, d'une part les relations de largeur des rides avec l'intensité du mouvement de balancement, et d'autre part l'équidistance des rides successivement formées par une action identique.

Cette analyse du phénomène nous permet de préciser, mieux que nous ne l'avons fait jusqu'à présent, la loi fondamentale de la largeur des rides. La largeur des rides, soit la distance d'une crête à l'autre, est le trajet que ferait, dans un mouvement de balancement, un grain de sable librement transporté par l'eau. On pourrait facilement démontrer que la longueur l de ce trajet dépend :

en fonction directe, de l'amplitude horizontale du balancement de l'eau ;

en fonction directe, de la vitesse du courant de balancement, qui entraîne d'autant plus facilement le sable qu'il marche plus rapidement ;

en fonction inverse, de la densité du sable ;

en fonction inverse, de la grosseur des grains. [1]

Dans du sable où des grains de grosseurs et de densités différentes seraient mélangés, ce seront probablement les grains les plus lourds et les plus gros dont le trajet déterminera la largeur des rides.

[1] Nous expliquerons plus loin la contradiction apparente entre cette formule qui attribue aux rides une largeur d'autant plus grande que le sable est moins grossier, et la loi expérimentale que nous avons établie, et que nous confirmerons par l'étude des faits naturels ; cette loi dit que, toutes choses égales, la largeur des rides est en raison directe de la grosseur des grains du sable.

De ces faits il résulte que les rides de fond sont dues à l'action des vagues superficielles du lac, qui se manifestent dans la profondeur par un mouvement de balancement de l'eau, ou, si l'on veut, par des courants horizontaux alternant dans leur sens; que ces courants soulevant le sable tendent à la formation de dunes [1], mais que l'alternance dans la direction des courants change le type des dunes et le transforme dans le type des rides. Les éminences ainsi dessinées dans le sable ont une forme régulière, les deux talus étant symétriques, et elles présentent une immobilité fondamentale; la crête se déplace légèrement à la manière des dunes pendant la durée très courte de l'action de chacun des courants, mais elle est ramenée en arrière par le courant de retour.

L'origine théorique des rides doit donc être rapportée à la formation des dunes. Ainsi s'explique la ressemblance que nous avons constatée dans la répartition des matériaux. Dans les rides comme dans les dunes, ils se distribuent en ordre de grosseur le long des talus d'éboulement, les grains les plus fins restant au sommet, les plus grossiers descendant dans le fond. Seulement, par la reproduction cent fois répétée des mouvements qui agitent le sable, dans la formation des rides, la distribution des matériaux suivant leur grosseur est beaucoup plus parfaite dans les rides que dans les dunes.

Cette description des dunes que j'oppose aux rides se rapporte aux dunes parfaites, établies par l'action d'un courant continu, tel qu'il a lieu au fond d'une rivière, ou à l'air, par l'effet d'un vent continu et prolongé. Quant aux dunes du désert, des bords de l'océan ou des lacs, elles n'ont pas ordinairement la forme typique; l'alternance irrégulière des vents qui soufflent tantôt sur une face, tantôt sur l'autre, et cela sans aucune régularité dans les changements de direction, leur donne généralement une forme intermédiaire entre celle des dunes, telles que je les ai décrites, et celle des rides; elles se rapprochent plutôt de cette dernière. C'est le cas pour la plupart des dunes que j'ai vues sur les bords de la Méditerranée, entre Cette et le Grau

[1] J'ai pu constater la justesse de cette interprétation, en observant les mouvements des grains de sable dans la cuve oscillante de M. C. de Candolle; grâce à la lenteur des mouvements que l'on peut obtenir dans cet excellent appareil d'expérimentation, j'ai pu, mieux que dans mes bassins où l'agitation de l'eau est plus tumultueuse, suivre avec précision le transport du sable, et vérifier la formation de la ride par la superposition de deux dunes, alternativement établies par les courants successivement de sens opposé dans l'eau.

du Roi, et entre Cette et le cap Brescou, sur les bords de l'océan Atlantique, près de Bayonne et à Arcachon, ou encore dans le Sahara, les dunes de Biskra et enfin, sur les bords du Léman, au fond du golfe de Coudrée où nous possédons un joli champ de dunes de quelques hectares. Le seul point où j'ai reconnu la forme typique des dunes dans ces formations aériennes, c'est entre la bouche de l'Adour et Biarritz ; les premières dunes au bord de l'océan étaient manifestement formées, le 21 novembre 1882, par l'action continue des vents violents qui soufflaient sans cesse du large sur la terre.

Revenons maintenant aux phénomènes naturels des rides modelées sur le sable de notre lac, et voyons si l'observation confirme notre interprétation théorique.

Limite de profondeur des rides de fond. Les rides sont limitées à la région littorale et ne se développent plus au-delà d'une certaine profondeur.

Cette affirmation résulte de l'observation directe. En février 1878, j'ai profité de la période où les eaux du lac sont le plus transparentes, pour chercher la limite des rides sur les flancs du mont. Grâce à la belle limpidité des eaux qui m'assurait la vision distincte jusqu'à 10 et 12 mètres de profondeur, j'ai constaté avec certitude cette limite en plusieurs points ; j'ai vu les rides, bien dessinées sur les talus du mont, cesser presque subitement, tellement qu'il n'y avait pas un demi-mètre d'erreur possible sur le point où je reconnaissais cette limite. Je l'ai vue :

A Morges,	devant l'église	à 6.5^m
»	devant le Beluard	7.0
»	devant la ruelle des Tanneurs	8.5
»	devant l'église catholique	9.1
A la pointe de la Venoge		7.3

A la date de ces observations, le lac était à la cote ZL + 1.170^m. Il était par conséquent de 18 centimètres au-dessous de sa hauteur moyenne, et de 30 centimètres au-dessus des plus basses eaux de cette époque. Nous pouvons donc dire que, près de Morges, la limite des rides est entre 6.2 et 8.8^m au-dessous du minimum de hauteur du lac.

En mars 1880, j'ai observé dans le Rhône, vers le pont de Bramois,

près de Sion, en Valais, de jolies rides dessinées suivant la ligne de plus grande pente sur le sable fin des talus du fleuve. Ces rides s'arrêtaient brusquement à quelque vingt centimètres de profondeur ; dans mes notes j'ai inscrit cette terminaison subite des rides comme montrant la limite d'action des vagues.

Mon affirmation se base aussi sur des expériences que j'ai faites dans le printemps de 1869. Egaré par des considérations théoriques erronées, je croyais pouvoir retrouver les rides à toutes les profondeurs dans le lac, et j'ai essayé de les constater dans les grands fonds. Pour cela j'ai attaché à mon fil de sonde une large plaque de tôle que j'enduisais de suif ; au-dessus, un appareil convenable donnait un coup de marteau sur la plaque au moment où elle touchait au sol. Avec cet instrument j'ai pris de nombreuses empreintes du sol entre 30 et 100 mètres de fond ; je n'y ai jamais vu trace d'une ride de fond (1). Cette preuve négative confirme les observations positives que je viens de citer.

Le fait d'une profondeur limite des rides résulte aussi des faits géologiques. Les rides de fond, très fréquemment dessinées sur les grès et molasses qui sont des formations littorales, manquent sur les marnes, calcaires et argiles qui sont des formations profondes (Ph. de la Harpe). (2)

Je considérerai donc comme démontré que les rides de fond sont limitées à la région littorale, qu'elles s'arrêtent à une faible profondeur, laquelle dépend évidemment de la puissance des vagues. Dans le Rhône où les vagues sont peu fortes, la profondeur limite est de quelques décimètres ; dans le lac Léman où les vagues sont plus énergiques, la limite descend à une dizaine de mètres ; dans l'océan où les vagues atteignent leur maximum, on constate les rides jusqu'à 20 mètres, d'après Ch. Lyell, à 188 mètres, d'après Siau. Je conclurai donc que les rides indiquent la limite de l'action effective des vagues superficielles ; qu'au-delà du point où les rides s'arrêtent, les vagues de la surface n'agitent plus assez le fond pour soulever le sable et l'accumuler en dunes ou en rides.

C'est là le procédé auquel je faisais allusion, page 238, lorsque je

(1) Par un procédé analogue, Siau a constaté des rides de fond jusqu'à 188m de profondeur dans l'Océan Atlantique.

(2) Bull. S. V. S. N., XV, 68, P. V. Lausanne, 1878.

renvoyais à plus tard la détermination de la limite d'action des vagues dans les profondeurs du lac. La limite d'action utile des vagues dans le Léman est donc par 8 à 10 mètres environ.

Largeur des rides. J'appelle largeur des rides, la distance qui sépare les arêtes de deux rides voisines.

Les rides de fond varient de largeur dans des limites assez étendues ; depuis 2 à 40 centimètres, je connais dans notre lac toutes les dimensions intermédiaires. (1)

La largeur des rides dépend essentiellement de la nature du sol. Là où le sol est vaseux, comme sur les talus du mont, ou certaines anses de la beine, les rides sont le moins larges ; là où le sable est fin, elles ont une largeur moyenne ; là où le sable est grossier, elles ont le maximum d'espacement. Un fait démonstratif à ce point de vue, c'est la permanence des dimensions des rides dans la même localité. Je connais, par exemple, à côté des ruines de la grande cité lacustre de Morges, un point où le sable, très grossier, présente de grandes rides de 38 centimètres de largeur ; je les connais depuis l'année 1854, époque de nos premières pêches d'antiquités, je les ai revues fréquemment, et j'ai constaté qu'elles ont toujours conservé les mêmes dimensions extraordinaires. — Sur le banc du Travers, près de Genève, il y a de même un groupe de grandes rides que j'ai retrouvées à plusieurs reprises, à bien des années d'intervalle.

De ces observations il semblerait résulter que l'intensité des vagues a bien peu d'influence sur la largeur des rides ; que la nature du sol est le seul facteur important. Et, en réalité, quelque violentes qu'aient été les vagues, je n'ai jamais observé, après la tempête, de variations importantes dans la largeur des rides, dans les localités où je les observe habituellement.

Nous avons vu cependant, d'après mes expériences en bassin clos, que la largeur des rides dépend du trajet parcouru par les grains du sable dans les mouvements de balancement de l'eau ; que ce trajet est en fonction directe de l'amplitude de l'oscillation, et de la vitesse du courant de balancement, et en fonction inverse du volume et de la

(1) Comme nous le verrons plus loin, la grandeur apparente des objets placés dans l'eau sous une couche de quelques mètres dépasse de près d'un tiers leur grandeur réelle. L'on attribue ainsi volontiers aux rides de fond une largeur trop forte, si l'on n'a pas pris la précaution de prendre une mesure exacte, à l'aide d'un mètre descendu dans l'eau, ou d'opérer une correction à l'appréciation faite au juger.

densité des matériaux. Comment se fait-il que dans la nature, dans le lac, la largeur des rides soit uniquement en relation avec la constitution du sol, sans que l'intensité des vagues semble y entrer en rien ; comment les sables les plus grossiers donnent-ils les rides les plus larges ? Cela semble en contradiction avec la loi que je viens de rappeler.

Cela s'explique par l'intervention d'un autre fait que nous avons signalé plus haut, à savoir que les rides ne s'établissent pour chaque grosseur de sable que par une intensité moyenne d'oscillation ; que pour chaque grosseur de sable, les courants trop faibles ne déplacent pas les grains, que des courants trop forts les soulèvent trop et les tiennent en suspension dans l'eau. Plus le sable est grossier, plus cette intensité relative des courants, qui peut permettre l'établissement des rides, doit être forte ; ce ne sont que de très puissantes vagues qui peuvent soulever le gros sable de certaines beines du littoral.

Par conséquent, pendant une violente tempête, les sables très grossiers peuvent être ordonnés en rides au moment des plus fortes vagues ; pendant ce temps, les sables plus légers sont bouleversés et soulevés comme des poussières qui salissent l'eau. Ce ne sera que plus tard, lorsque les vagues auront diminué d'intensité, que les rides se dessineront sur les sables moyens, et seulement enfin, lorsque les vagues seront devenues très faibles, que les sables les plus fins et la vase se déposant sur le fond, les rides commenceront à s'y développer.

Ainsi à chaque grandeur des vagues correspond une grosseur du sable qui peut être modelé en rides ; pour les autres grosseurs, l'effet des mêmes vagues est ou nul ou trop violent, il n'est pas efficace. Quant à la largeur des rides qui s'établiront ainsi, elle sera déterminée, comme nous l'avons vu plus haut, par le trajet des grains de sable soulevés dans le mouvement de balancement de l'eau.

D'une autre part, comme l'intensité des vagues va en décroissant de la surface de l'eau vers la profondeur, à mesure que la profondeur augmente, les vagues ne sont plus capables de soulever que des sables de plus en plus légers. Aussi voyons-nous en général la largeur des rides diminuer à mesure que la profondeur augmente ; les rides que j'ai vues à l'extrême limite, sur les flancs du mont, étaient fort étroites.

Ainsi se résout d'une manière satisfaisante la contradiction apparente qui nous arrêtait ; ainsi s'explique la relation constante observée dans le lac entre la largeur des rides et la nature du sol.

La largeur des rides peut être bien plus considérable dans l'océan que dans notre lac ; les vagues plus puissantes sont capables de soulever un sable bien plus grossier, et de le modeler en rides bien plus larges. M. Hunt a mesuré dans la baie de Brighouse, sur la côte de Kirkcudbright, des rides de 75 centimètres d'une crête à l'autre.

Direction des rides. Dans un bassin à expériences, l'orientation des rides est en général telle que les crêtes des rides sont perpendiculaires aux courants de balancement de l'eau ; dans la nature, lorsque l'on peut étudier la formation des rides, on les voit de même être orientées perpendiculairement à la direction des vagues, ou parallèlement à leurs crêtes.

J'ai, au sujet de la direction des rides, deux bonnes séries d'observations.

En février 1878, j'ai profité de quelques beaux jours pour dessiner sur ma carte du golfe de Morges la direction des rides, partout où elles étaient évidentes. J'ai reconnu, une fois la carte établie, que, d'une manière générale, cette direction correspondait à peu près à celle des crêtes des vagues du sudois, les plus grandes vagues qui viennent battre notre plage ; les rides s'infléchissaient comme le font ces vagues, en tendant à devenir parallèles à la ligne accidentée du rivage. Il y avait cependant de nombreuses exceptions, surtout près de la rive ; dans les points où le fond vaseux était recouvert de petites rides très étroites, celles-ci présentaient souvent des directions fort aberrantes ; elles semblaient du reste de formation plus récente que les grandes rides du sable de l'ensemble de la beine.

Dans une autre série d'observations j'ai noté pendant tout un hiver la direction des rides, sous le débarcadère des bateaux à vapeur de Morges, qui s'avance fort en avant dans le lac et domine un fond de sable vaseux où les ridès s'établissent très bien :

Le 18 janvier 1877, je note et dessine la direction des rides dont la crête est orientée N.E.-S.O., presque parallèlement aux crêtes des vagues de vaudaire.

24 janvier. L'orientation des rides n'est pas modifiée, et cependant de fortes vagues de bise ont agité le lac les 21 et 22 janvier ; la crête des vagues était orientée N.N.O.-S.S.E.

28 janvier. Même direction générale des rides. Il a régné les 26 et 27 janvier de grosses lames de vaudaire, dont les crêtes étaient dirigées N.N.E.-S.S.O., à peu près parallèles à celles des rides.

1er février. De fortes vagues de sudois ont agité le lac depuis le 28 janvier : la crête des lames était dirigée E.-O. Rien n'est changé à l'orientation des rides.

12 mars. Même direction des rides, malgré la forte bise du 11 mars.

20 mars. Même direction des rides ; elles sont un peu effacées, les sillons tendent à se combler.

25 mars. Même orientation ; les rides sont plus saillantes et mieux dessinées.

25 avril. Même orientation des rides. (1)

Pendant les trois mois que ces observations ont duré, les rides n'ont pas été sensiblement modifiées dans leur direction, alors même que les vagues de bise, de vaudaire et de sudois ont frappé dans trois orientations différentes.

La direction des vagues n'aurait-elle aucune influence sur l'orientation des rides ? Etudions ce point plus attentivement.

D'une part, M. de Candolle a posé en loi que les rides de fond s'établissent perpendiculairement à la direction des courants de frottement oscillatoire de l'eau.

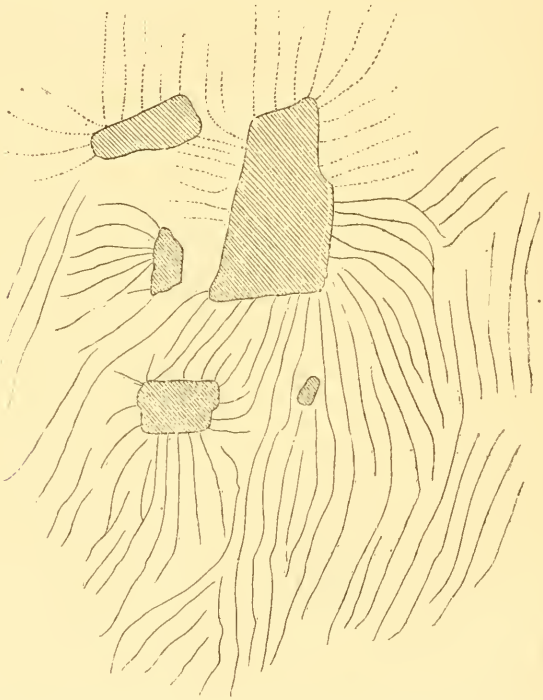
D'une autre part, j'ai vu qu'en traçant sur le sable d'une cuve à expériences une ligne oblique, ou en plaçant un obstacle oblique, même à 45° de la direction du plan de balancement, j'obtiens un système de rides ayant la même obliquité que la ligne initiale. Il est vrai que, si je continue à faire balancer l'eau assez fortement, ces rides obliques ne tardent pas à se découper en escalier, et à se reconstituer en un système de rides perpendiculaires au plan du balancement ; sous ce rapport, je me rapproche du naturaliste genevois. Mais cette transformation dans l'orientation des rides n'a lieu que lorsque le balancement est assez fort pour bouleverser presque complètement le sable. Si le mouvement est faible et fait seulement osciller légèrement la crête des rides, il n'y a pas déformation et l'on peut faire balancer l'eau pendant longtemps sans changer notablement l'orientation des rides.

A la lumière de ces expériences, j'interpréterai, comme suit, les faits observés dans le lac, devant Morges. Les rides de fond sont établies par des vagues puissantes qui remuent énergiquement le sol,

(1) Le 23 juin 1883, de même en novembre 1893, les rides que j'étudiais en 1877 sont complètement effacées, et je n'en puis pas voir de traces assez nettes pour soupçonner leur dernière orientation.

vagues de sudois dans l'ensemble du golfe de Morges (carte de février 1878), vagues de vaudaire sous le débarcadère des bateaux à vapeur (observations de 1877) ; leur direction est parallèle à la crête des vagues de l'eau. Une fois établies, ces rides persistent jusqu'à ce que des vagues d'intensité suffisante viennent de nouveau bouleverser le sol. Les vagues plus faibles, qui soulèvent parfois assez la vase pour salir l'eau, peuvent bien remuer un peu le sable et rafraîchir l'acuité des crêtes des rides ; mais elles n'ont pas assez de puissance pour modifier sensiblement l'orientation des rides.

On pourrait tirer une conclusion pratique de ce dernier fait : si dans une couche géologique on peut déterminer l'orientation des rides de fond, on en déduira la direction probable des plus fortes vagues qui agitaient le littoral au moment où ces rides ont été formées.



(Fig. 98.) Rides développées autour de quelques blocs émergeant du sable.

Le long du mur d'un quai, les rides de fond sont en général parallèles à ce mur. Cependant, le 7 février 1879, j'ai vu immédiatement contre le quai de Beau-Rivage, à Ouchy, des rides perpendiculaires à

ce mur, sur un espace de 50cm de largeur, les rides parallèles reprenant plus en avant.

Un obstacle saillant au milieu d'une plaine de sable, un pilotis, un bloc de pierre, modifient localement la direction des rides. Je me bornerai à donner comme exemple le croquis, fig. 98, dessiné le 25 janvier 1879, des rides qui entouraient un groupe de blocs erratiques situés à côté du débarcadère d'Ouchy, l'ancien débarcadère de Beau-Rivage, sous 1.5m d'eau. Dans ce croquis, les rides dessinées en traits pleins ont été fidèlement copiées d'après nature; la partie pointillée donne seulement la direction générale des rides, une brise s'étant levée pendant que j'exécutais mon dessin, et m'ayant empêché de suivre avec soin le détail de chaque ride. D'après ce croquis, la direction des rides était en général perpendiculaire aux faces des pierres; cela explique, par analogie, mon observation du 7 février 1879, devant le quai de Beau-Rivage d'Ouchy.

Rides anormales. Dans les rides normales l'arête est simple, et elle est limitée de chaque côté par un sillon unique, qui est commun aux deux rides voisines.

Quelquefois la forme se complique par l'apparition d'une ride secondaire, peu saillante au milieu du sillon, de telle manière qu'une ride de grande taille et bien marquée alterne avec une petite ride peu élevée (fig. 99). J'ai observé ce fait le 11 février 1878, au milieu de la beine de Morges, par 4 mètres de fond, près du bord du mont; depuis lors j'ai vu de nouveau plusieurs fois ce type et en examinant le moulage du 5 janvier 1869 dont j'ai parlé plus haut, j'y trouve des traces de cette anomalie (fig. 95, *a*).

(Fig. 99.) Rides anormales, avec alternance d'une petite ride intermédiaire.

Dans mes bassins à expériences, j'ai surpris la formation de ce type anormal. Lorsque j'ai déterminé, dans du sable de grosseur peu uniforme, de larges rides par un balancement énergique de l'eau, si je modère le balancement, le sable le plus fin peut se disposer en rides dont la largeur est moitié moindre que celles du sable plus grossier; au milieu du sillon des grosses rides, il s'établit une petite ride moins élevée, et formée de matériaux plus fins et plus légers que les grosses rides qui le bordent.

Le 7 avril 1875, j'ai observé sous le pont du Rhône de Riddes en Valais, des rides de fond à arête double, dessinées sur le sable perpen-

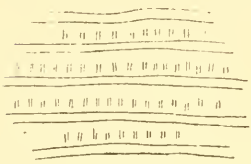
diculairement à la ligne du rivage (fig. 100). Ce type anormal pourrait peut-être s'expliquer, si l'on admettait que des matériaux très fins et légers comme la terre dans mon observation de Massongex (voir plus haut) avaient formé l'arête d'une ride simple, et que plus tard, cette terre ayant été lavée par l'eau, il n'était resté que le sable plus lourd ou plus adhérent.

(Fig. 100.) Rides anormales avec arêtes doubles.

Le 8 février 1878, j'ai noté à Ouchy, devant le quai qui s'étend de Beau-Rivage aux Bains publics, deux ou trois rides parallèles au mur du quai, qui présentaient une arête triple (fig. 101). Je ne sais pas expliquer cette forme.

(Fig. 101.) Rides anormales avec arêtes triples.

Enfin j'ai vu deux ou trois fois, entre autres dans le port de Rolle, le 16 novembre 1878, un double système de rides dirigées à angle droit l'un de l'autre (fig. 102). Un des deux systèmes de rides était complet, et formé de belles rides larges et bien modelées ; le second système était incomplet et remplissait seulement, de ses arêtes et de ses sillons, les sillons du premier système. J'interprète ces rides compliquées de la manière suivante. De fortes vagues avaient dessiné sur le sable les rides régulières du premier système. Plus tard, de la vase légère s'est déposée au fond des sillons de ce premier système. Puis des vagues moins puissantes, dirigées perpendiculairement aux premières, sont survenues ; elles n'ont pu bouleverser assez le sol pour effacer les rides du premier système, mais elles ont pu soulever la vase accumulée dans les sillons et y dessiner le second système des rides.


(Fig. 102.) Quadrillage de deux systèmes de rides.

Ajoutons pour terminer que souvent, dans le lac ou les rivières, on voit des rides présenter, d'une manière incontestable, l'apparence des dunes, les deux talus étant différemment inclinés. Ce fait s'explique facilement par l'intervention d'un courant continu qui, s'emparant des rides précédemment modelées par les vagues, les transforme en dunes, en entraînant le sable dans une direction constante. Grâce à la combinaison des courants et des vagues, on peut comprendre qu'il y ait dans une eau dormante, comme un lac ou une mer, tous les intermédiaires possibles entre les dunes et les rides.

XIV. **Les courants.**

Dans tout lac il y a des courants, des déplacements des masses d'eau qui se transportent d'un lieu à l'autre. Par leur origine, nous devons les diviser en plusieurs classes.

1° *Les courants d'écoulement du lac.*

Le lac n'est qu'un fleuve élargi ; en apparence, seulement, son eau est stagnante, en réalité elle s'écoule des affluents vers l'émissaire. Nous avons, de ce chef, les courants suivants :

A. Le courant d'entrée des affluents qui ne tardent pas à se perdre dans la masse générale immobile du lac. Selon les rapports de densité de l'eau fluviale et de l'eau lacustre, densités qui sont régies par la température relative des eaux et par leur charge en alluvion impalpable, l'eau de l'affluent s'étale à la surface du lac, ou bien elle descend dans les couches moyennes ou profondes, où elle s'étend en nappe horizontale quand elle a trouvé la couche de même densité qu'elle.

Le courant de surface ne garde pas longtemps son individualité. A quelques centaines de mètres de son embouchure, lorsque l'eau du Rhône se répand à la surface, son courant n'est plus perceptible ; la masse d'eau apportée par l'affluent s'étale à droite et à gauche, et son mouvement n'est plus apparent.

Au contraire, les courants profonds qui font descendre, le long du talus du delta sous-lacustre, l'eau plus lourde du fleuve froid, et chargé d'alluvion en suspension, peuvent se prolonger fort loin. Au chapitre du ravin sous-lacustre du Rhône (1), nous avons vu qu'on peut en constater les traces par le sillon creusé dans le sol du lac jusqu'à 9.5^{km} et plus de l'embouchure du fleuve.

Nous avons décrit (2) l'entrée du Rhône dans le lac, ce qu'on appelle la b a t a i l l i è r e. Il y a une bataillière à l'embouchure de chaque affluent gonflé par des eaux chargées d'alluvion.

(1) T. I, p. 63 et 381.

(2) T. I, p. 386.

B. Le courant de sortie du lac. L'émissaire entraîne l'eau loin du lac et son courant est très fort aux bouches du port de Genève, encore très visible sur le banc du Travers, où il peut, dans les grands débits du Rhône, avoir une vitesse de 5^m par minute (v. p. 21); il est imperceptible lorsque l'on remonte dans le lac proprement dit.

C. Le courant propre du lac qui transporte l'eau des affluents vers la sortie de l'émissaire a déjà été décrit, page 20 et suivantes. Nous avons, par des calculs divers, obtenu comme valeurs maximales pour la vitesse de ce courant, en mètres par minutes :

Section de Vevey-St Gingolph	$0.065^{m\ min}$
— d'Ouchy-Petite Rive	0.027
— de St Prex-la Drance	0.032
Détroit de Promenthoux	0.27
Banc du Travers de Genève	4.8

2° *Les courants de convection thermique.*

Les courants causés par les changements de densité de l'eau, qui se réchauffe ou se refroidit, se présentent sous deux formes : les courants verticaux, les courants horizontaux.

A. Les *courants verticaux* dus à l'augmentation de densité de la couche supérieure, ou à la diminution de densité de la couche inférieure du lac.

Le premier cas a lieu lorsque la surface du lac, dans les températures supérieures au maximum de densité de l'eau, se refroidit, ou bien lorsque la surface, dans les températures inférieures à 4°, subit un réchauffement. Ce sont ces courants verticaux qui sont cause de la grande uniformisation de température qui a lieu dans tout lac en automne, qui a lieu après le dégel dans un lac pris par la glace de l'hiver. Nous décrirons plus à fond ce procès à propos de la thermique du lac.

Le deuxième cas, abaissement de la densité des couches inférieures est le résultat de l'échauffement du fond du lac par la chaleur interne de la terre ; cette action est très faible, et ces courants sont insignifiants et inappréciables.

— Il est une question difficile, qui se pose au sujet de ces courants verticaux de convection thermique. Quelle est leur forme ?

Prenons le fait le plus simple, le refroidissement automnal des couches supérieures qui ont été réchauffées l'été précédent. La couche la plus superficielle, la couche de surface, est refroidie par radiation et par contact avec un air froid ; elle devient plus lourde que la seconde couche qui lui est sous-jacente, elle doit donc descendre au-dessous de cette seconde couche, et être remplacée par celle-ci qui devient surface supérieure du lac. Comment se fait cette descente ?

Est-ce par petits filets d'eau froide qui traversent la couche sous-jacente ? par transport individuel de chaque goutte d'eau de la couche supérieure qui, devenue plus lourde que la couche inférieure, traverse celle-ci comme une goutte de pluie tombe dans l'air ?

Ou bien est-ce par une descente en masse de la couche supérieure qui, quand elle est assez alourdie, rompt la couche sous-jacente en un point de plus faible résistance ou de plus forte action, et s'écoule en cascade, en courant d'ensemble jusqu'à la profondeur exigée par les conditions de densité. — Voici comment je me représente ce procès. La couche supérieure se refroidit dans son ensemble de quelque fraction de degré ; elle est donc plus dense, plus lourde que la couche sous-jacente ; elle doit donc tendre à descendre. Mais quelque mobiles que soient les molécules d'eau, il y a dans leurs déplacements certains frottements qui doivent être dominés pour que le mouvement ait lieu. Tant que la différence de densité n'est pas assez forte pour vaincre ce frottement, les couches superposées restent dans un état d'équilibre instable, prêtes à se déplacer sitôt qu'une impulsion quelconque déterminera le mouvement. Un accident quelconque, une vague, le passage d'un bateau, d'un poisson, un refroidissement local plus intense, occasionnent la rupture de l'équilibre instable, et toute la courbe superficielle attirée successivement vers ce point de rupture descendra en colonne verticale, en courant limité qui traversera les couches de densité inférieure, et ne s'arrêtera que dans la couche de même densité que la sienne.

Je ne suis pas à même de juger, par des faits d'observation directe entre ces deux hypothèses ; mais je suis disposé à adopter, de préférence, la seconde, et cela, en particulier, par les raisons suivantes :

a C'est par des courants généraux de convection que se propage la chaleur dans un vase rempli d'eau soumise à un échauffement local, à la flamme d'une lampe à alcool par exemple, pour aussi longtemps que des bulles de gaz n'interviennent pas dans le procès.

b A la fin du refroidissement automnal, lorsque la couche d'eau de température uniforme mesure des dizaines et des centaines de mètres d'épaisseur, je ne saurais comprendre les allures de gouttes d'eau ou de filets minces, traversant ces grands espaces sans s'égaliser avec la température des couches traversées. Il en résulterait que les couches supérieures devraient se refroidir plus que les couches inférieures, et le lac présenterait dans la saison froide une stratification anormale, instable, avec des couches supérieures plus froides que les couches sous-jacentes; ce qui n'est pas.

c Pendant cette saison de refroidissement de l'eau, si je promène un thermomètre à la surface du plein lac, je constate des différences locales de température, très faibles, il est vrai, de quelques dixièmes de degré au plus, différences qui correspondent bien à l'hypothèse de la descente en masse, par courants d'ensemble, de la couche supérieure refroidie.

B. Des courants horizontaux résultent, quand le lac est en stratification thermique directe [1] de l'échauffement (ou du refroidissement au-dessous de 4°) plus énergique en certains points qu'en d'autres; dans la région littorale, par exemple, d'un côté, et dans la région pélagique de l'autre; ou bien dans une partie du lac échauffée par le soleil, en opposition à une autre partie cachée dans l'ombre d'un nuage ou d'une montagne. De ces différences de température dérivent des différences de densité, qui, lorsqu'elles ont atteint une valeur suffisante, déterminent des courants dans l'eau; les couches plus légères glissent sur les couches plus lourdes, et s'étalent à la surface en nappe élargie.

D'un autre côté, si l'hypothèse que nous avons exposée pour la descente en masse de l'eau refroidie à la surface est exacte, le courant vertical descendant doit déterminer, par appel, des courants horizontaux qui viennent converger vers le point de chute de l'eau.

3° *Les courants causés par les vents.*

L'air en mouvement, une brise ou un vent, en caressant la surface de l'eau, l'entraîne vers la côte sous le vent et détermine un courant supérieur très bien marqué. Ce courant de surface est facilement

[1] Voir au chapitre de la thermique.

visible, même au milieu des mouvements complexes des vagues par le transport des poussières et des objets immergés dans l'eau ; sa vitesse, assez grande à la surface même de l'eau, va rapidement en décroissant dans les couches sous-jacentes.

Il résulte de ce courant une accumulation d'eau vers la côte sous le vent, et nous avons décrit, page 29, les dénivellations importantes dues à cette action. Mais une telle élévation d'eau sous le vent ne peut pas augmenter indéfiniment ; il s'établit bientôt en compensation du courant de surface, un courant profond, courant de retour, qui marche en sens inverse du courant supérieur, en sens inverse du vent. Je puis citer comme preuves de l'existence du courant de retour :

a. Le fait que les filets profonds des pêcheurs sont dans les grandes tempêtes entraînés, parfois à de longues distances, à des kilomètres dans certains cas, toujours dans la direction contre le vent ; quand les pêcheurs les retrouvent, ils les voient déchirés, tordus, remplis de débris ; ils ont évidemment été soumis à un courant violent.

b. Mon observation du 2 août 1884, dans un petit lac de la moraine du glacier inférieur de Fée, vallée de Saas. L'eau de cet étang resplendissait de paillettes de mica ; une telle eau montre admirablement les plus faibles mouvements du liquide par les teintes diverses, par le miroitement que donne la lumière réfléchie sur les lamelles de mica diversement inclinées. J'ai vu sur ce lac, un jour que la surface était ridée par une brise légère, la formation d'un courant de surface, dans la direction et le sens du vent ; j'ai vu ce courant s'arrêter brusquement à quelques décimètres de la rive sous le vent, s'y heurter contre une masse d'eau immobile le long de la côte, et devenir plongeant verticalement dans la profondeur. Le courant de retour, profond, a échappé à ma vue, l'eau trouble étant tout à fait opaque, mais je l'ai vu remonter à la surface, le long de la rive sur le vent ; en ce point, je pouvais constater, à quelques décimètres de la côte, le surgissement de l'eau qui, venant de la profondeur, se relevait, s'inclinait, suivant une ligne bien dessinée, pour reprendre ensuite la direction horizontale du courant superficiel. [1]

c. Une autre preuve de la circulation générale des eaux causée par les grands vents est donnée par les variations de la température de l'eau ; par un grand vent, en été, quand le lac est stratifié thermique-

[1] Archives, Genève, XII, 409, 1884.

ment, la température de l'eau s'abaisse notablement à la côte sur le vent ; le courant de retour doit remplacer l'eau emmenée par le courant de surface, et pour cela un courant vertical ascendant le long de la côte sur le vent amène de l'eau froide des couches profondes.

d. L'apparition des eaux troubles du Rhône sur la côte septentrionale du Léman en temps de forte bise. C'est un phénomène étrange et qui m'a longtemps préoccupé. Par une grande bise, lorsque le vent du nord fait rage depuis un ou deux jours, si l'on contemple le Léman d'une station un peu élevée, les monts de La Vaux, Lausanne, les collines de Morges, on constate que le lac est séparé en deux zones différentes : le long de la rive, jusqu'à un ou deux kilomètres en avant, l'eau est verdâtre ; en plein lac, elle est d'un bleu sombre. La bande des eaux verdâtres est bien limitée au large par une ligne franche ; cette ligne n'est pas parallèle à la rive ; elle forme des caps et promontoires, souvent très accentués, dont le dessin varie d'une fois à l'autre. La bande des eaux verdâtres peut commencer en amont de Vevey, et s'étendre jusqu'à Rolle et au-delà ; je l'ai vue jusqu'à Fleur d'Eau. Si nous descendons au lac, si nous traversons jusqu'en plein lac, nous constatons que l'eau bleue du large est de l'eau parfaitement pure, que l'eau verdâtre de la côte est légèrement opaline. Ce n'est pas de l'eau grise ou jaunâtre opaque, comme l'eau salie par un affluent débordé ; du reste, en temps de bise, (la bise est un vent sec) les affluents sont en général à l'étiage et limpides. Ce n'est pas de l'eau grise ou jaunâtre, comme l'eau salie par le brisement des lames sur la grève ; du reste, les vagues du vent du nord partant de la côte septentrionale, qui est la côte sur le vent, ne sont pas assez fortes dans la région que nous considérons pour soulever la vase de la beine. L'eau est opaline ; elle n'est ni louche, ni sale. La limite de visibilité (voir plus loin), est par 3 ou 4^{m} de profondeur. Si je filtre cette eau, il ne reste rien d'extraordinaire sur le papier ; la matière qui opalinise l'eau est absolument impalpable.

Que signifie cette apparition ? Après avoir épuisé toutes les hypothèses possibles, j'en suis revenu à l'explication [1] qui est contenue dans le nom vulgaire donné par nos pêcheurs à ces eaux opalines, qu'ils appellent les troublons (eaux troubles) du Rhône. Les eaux verdâtres qui nous occupent sont les eaux profondes du lac ramenées

[1] S. V. S. N., 19 juin 1889.

à la côte sur le vent par le bras ascendant du courant de retour du vent. — En été, les eaux troubles du Rhône, alourdies par leur charge d'alluvion, descendent dans les couches moyennes et inférieures du lac et s'y étalent en nappe horizontale ; elles s'étendent dans le lac aussi loin que la couche à laquelle elles appartiennent ; nous les avons vu former par leur dépôt la plaine horizontale des grands fonds du lac (1). Le fond de la cuvette du lac doit être rempli en été de couches stratifiées d'eau limoneuse, de plus en plus sales, à mesure qu'elles sont plus profondes (2). Or quand un vent puissant détermine une circulation générale de l'eau par les courants que nous étudions dans ce paragraphe, le courant de retour, s'il descend assez bas, enlève une certaine quantité de cette eau limoneuse ; celle-ci est ramenée à la surface par le courant vertical ascendant de la côte sur le vent ; elle est brassée par les vagues et opalinise l'eau littorale, puis elle est entraînée en avant par le courant de surface. De là la formation de la large bande des eaux côtières opalines, et verdâtres à distance.

Cette explication semble satisfaisante. On en démontrera définitivement la justesse, quand on constatera, par le vent sudois, ou par le bornan, un fait analogue sur la côte de Savoie, dans le golfe d'Amphion, par exemple.

Les courants de retour sont en général localisés à une faible profondeur ; on peut admettre qu'ils sont plus ou moins limités au bas de la couche de densité uniforme (3), et que ce n'est que par entraînement progressif qu'ils peuvent descendre dans des couches plus inférieures. D'après les allures de la stratification thermique de l'eau, les courants de retour devraient avoir lieu vers 10, 20 et 30^{m} en été ; mais en automne et en hiver, lorsque la température de l'eau s'est uniformisée dans une couche d'épaisseur de plus en plus forte, qui finit par envahir toute la masse du lac, on peut voir ces courants agiter le lac

(1) T. I, p. 48 et 389.

(2) Mon collègue et ami, le professeur Henri Carrard, de Lausanne, qui savait appliquer son enthousiasme investigateur aussi bien aux choses du lac qu'aux grandes études de l'histoire et de la science juridique, m'a raconté qu'en descendant une bouteille au fond du lac, au large d'Ouchy, il l'avait ramenée pleine d'une eau limoneuse. Je n'ai jamais été aussi heureux ; je n'ai jamais réussi à constater l'opalinité de l'eau dans les quelques litres que je ramenais du fond du lac avec mes appareils ; si j'avais versé cette eau dans un tube de Bunsen, j'aurais sans doute reconnu une diminution de sa transparence.

(3) Voir plus loin au chapitre de la thermique.

jusque dans ses plus grands fonds. C'est ainsi que pendant l'ouragan-cyclone du 20 février 1879, le plus terrible dont nous ayons conservé la mémoire, les filets de pêcheurs de féra, descendus dans le lac devant Ouchy par 200 et 300m de fond, ont été arrachés et entraînés contre le vent par ces courants de retour profonds. (1)

Quand de fortes vagues viennent battre la côte sous le vent, elles soulèvent la vase de la beine et salissent l'eau ; l'alluvion impalpable en suspension dans l'eau (alluvion lacustre) l'alourdit, augmente sa densité et tend à établir un courant descendant qui l'entraînera dans les grands fonds, en suivant la déclivité des talus. Ce courant s'associe au courant vertical descendant provoqué par l'accumulation de l'eau à la côte sous le vent. Mais tandis que ce dernier ne saurait descendre bien profond, par le fait de la stratification thermique contre laquelle il est impuissant, le courant déterminé par l'alourdissement de l'eau, par une surcharge d'alluvion, peut dominer la stratification thermique ; l'eau superficielle chaude a sa densité augmentée par les poussières qu'elle tient en suspension, tellement qu'elle peut devenir plus pesante que l'eau froide, mais pure, des couches inférieures ; il peut donc y avoir entraînement, dans les couches profondes du lac, de l'eau chaude, mais salie, de la surface, quelque chose d'analogue à ce que nous avons vu dans la descente, au fond du lac, des eaux lourdes des affluents.

4° *Courants dus à la pression atmosphérique.*

Les variations locales de la pression atmosphérique déterminent des dénivellations du lac ; l'eau s'affaisse là où la pression est la plus forte, elle se soulève là où celle-ci est la plus faible. A ces variations du niveau, correspondent des déplacements horizontaux de l'eau, et, par conséquent, des courants centrifuges autour d'une décrue locale, centripètes autour d'une crue ; lorsque la dénivellation cesse, des courants en sens inverse rétablissent l'horizontalité de la surface. L'importance, l'intensité, la direction de ces courants doivent varier beaucoup d'un cas à l'autre.

(1) *H. Chatelanat*, Bull. S. V. S. N. XVI 533 ; *F.-A. Forel*, ibid., 510. Lausanne, 1879.

5° *Les courants des seiches.*

Indépendamment des courants développés par les dénivellations des seiches aux goulets des ports et lagunes en communication avec le lac (v. p. 53), l'oscillation rythmique de la masse du lac, que nous avons vu caractériser les seiches, doit produire des courants d'ensemble. Quand, dans une seiche uninodale, l'eau s'élève à Genève pour s'abaisser à Villeneuve et vice-versa, il y a déplacement horizontal de l'eau pour satisfaire à ces dénivellations ; il y a va-et-vient de la masse générale du lac ; si la durée de la seiche uninodale est 73^{min}, le courant dans chaque sens doit durer 36.5^{min}. De même, dans les seiches binodales, il doit y avoir un va-et-vient alternatif et de sens opposé dans chacune des moitiés du lac, de durée égale à la moitié de la seiche binodale, c'est-à-dire à 17.7^{min}.

Mais tandis que la dénivellation des seiches, quoique très faible, quoique masquée le plus souvent par les mouvements plus rapides du lac, est encore appréciable à l'œil et peut se mettre en évidence par des méthodes convenables d'observation, les courants dus aux seiches sont absolument inobservables. On en jugera par le calcul suivant.

Je prends le cas le plus favorable que nous ayons à notre disposition, celui des seiches longitudinales uninodales du Léman, et je veux rechercher la vitesse du courant dans le lieu où il doit être le plus fort, au détroit de Promenthoux. Les plus grandes seiches de Genève que nous ayons observées depuis vingt ans, sont celles du 20 août 1890, avec 62^{cm} de hauteur maximale. Dans cette occasion, il y avait interférence d'uninodales et de binodales ; admettons que l'uninodale de ce jour eût à Genève 31^{cm}, disons 30^{cm} de hauteur. Le nœud de balancement des uninodales est à la sortie du détroit de Promenthoux, dans le Grand-lac. Supposons que la nappe d'eau restât plane depuis l'axe du nœud jusqu'au sommet du ventre d'oscillation, nous pouvons calculer la valeur du déplacement d'eau. La quantité d'eau qui, dans le mouvement de va-et-vient des seiches, passe d'un côté à l'autre du plan vertical de la ligne nodale, est égale à la superficie de la partie du lac à laquelle appartient le ventre considéré (dans ce cas la superficie du Petit-lac, 78.8^{mk^2}), multipliée par le tiers de la hauteur extrême de la dénivellation (le tiers de $30^{cm} = 0.1^{m}$). Cela représente un volume de $7\,880\,000^{m^3}$. C'est une masse de près de 8 millions de mètres cubes

d'eau qui, dans chaque oscillation des seiches, doit passer d'un côté à l'autre du plan vertical du nœud de balancement. Or le détroit de Promenthoux, qui est le point le plus resserré près du nœud de balancement, a une aire de section de 135 000^{m2}. C'est donc une quantité de 58^{m3} qui doit passer par chaque mètre carré du détroit, ou, si l'on veut, un corps flottant dans l'eau subirait pendant chaque oscillation de seiche un va-et-vient de 58^{m} de longueur. Cela semble beaucoup, et une observation attentive, en temps favorable, le reconnaîtrait certainement. Mais cela ne donne qu'un courant bien faible. En effet, ce déplacement emploie 36.5 minutes dans chaque sens, ce qui ne produit qu'un courant de 1.6^{m} par minute. Un tel courant, visible par le calme plat, échapperait certainement à l'œil sitôt que le lac serait ridé par la brise la plus légère.

Et c'est là le courant de seiches le plus intense, dans la localité la plus favorable. Qu'en est-il des seiches ordinaires qui n'ont que quelques centimètres de hauteur ? Qu'en est-il partout ailleurs sur le lac ? On peut dire que ce courant des seiches est presque nul.

Et cependant, quelque faible qu'il soit, je crois pouvoir lui attribuer une action efficace et utile pour l'égalisation du sol du lac.

Nous avons vu que la plaine centrale du Léman est parfaitement égale et unie, que les irrégularités de son sol sont nulles. J'ai admis (1) que l'égalisation de ce plancher était due en partie au dépôt de l'alluvion qui, recouvrant d'un tapis uniforme les accidents du terrain primitif, dépose cependant un peu plus sur les dépressions de ce sol, un peu moins sur les éminences, et tend ainsi à niveler les reliefs. Il me paraît qu'à cette action doit s'ajouter celle du courant des seiches. Tout courant, en effet, surtout s'il est alternatif, s'il est un va-et-vient, doit égaliser le dépôt d'une pluie de poussières précipitées ; les particules entraînées par le courant ne s'arrêtent pas sur les parties saillantes ; elles s'accumulent dans les remous formés par les creux. Mais pour que cette action soit efficace, il faut qu'il y ait rapport convenable entre la vitesse du courant et la vitesse de chute des poussières précipitées. Or, si le courant des seiches est infiniment faible, la vitesse de précipitation de l'alluvion en suspension dans l'eau du lac est aussi infiniment lente. Nous avons vu (2) la lenteur prodigieuse de

(1) T. I, p. 389.

(2) T. I, p. 107.

l'éclaircissement d'une eau touchée par l'alluvion du lac ; en 4 jours, des flacons remplis d'une eau faiblement argileuse n'étaient redevenus transparents que sur une épaisseur de 6.5^{cm}. Cette vitesse de précipitation est du même ordre que la vitesse de déplacement du courant des seiches ; ce dernier peut donc agir pour ordonner et disposer également ces poussières impalpables qui tombent sur le sol du lac.

Telle est la classification théorique que nous pouvons établir dans les courants du lac. Dans la pratique, il est souvent fort difficile de les distinguer et de déterminer à quelle classe ils appartiennent.

Les courants du lac sont essentiellement irréguliers et inconstants ; ils ne se prêtent à aucune description générale. Ils sont le plus visibles devant les pointes et caps saillants dans le lac, comme ceux de St-Prex, d'Yvoire, de St-Sulpice, etc. Ils sont appelés sur le Léman du nom local de *ladière* ou *lardière* ; ces courants sont le plus forts après les tempêtes, orages et autres perturbations atmosphériques et lacustres. Les bateliers croient avoir constaté un renforcement des courants avant la tempête, et ils y voient un pronostic de mauvais temps. J'ai souvent entendu les pêcheurs dire : « Nous allons avoir un changement de temps ; la ladière monte (ou elle descend). » Je regrette de n'avoir pas mieux noté ces énoncés, probablement justifiés, fondés sur l'expérience pratique de ces hommes de lac.

Les plus forts courants qui aient été, à ma connaissance, mesurés sur le Léman, avaient une vitesse de :

Morges	21 mai 1869	12^{m} ^{min}	F.-A. Forel.
»	26 juin 1876	16 —	—
Vevey	. . . . .	18 —	R. Blanchet. (1)

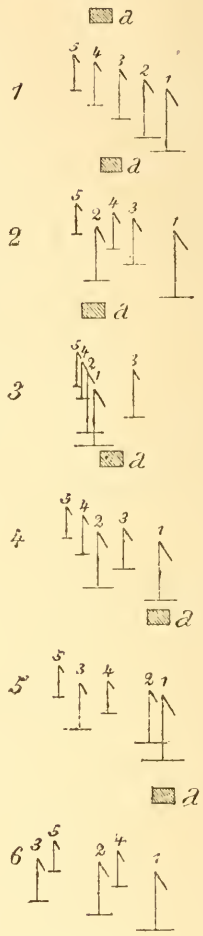
18^{m} à la minute, un peu plus d'un kilomètre à l'heure ; c'est là une vitesse bien faible comparée aux grands courants marins — le courant de la Floride, par exemple, atteint dans le vieux canal de Bahama une vitesse de 7 à 8^{km} à l'heure ; le courant de marée du ras Blanchard, entre les îles Normandes, dépasse parfois 6^{km} à l'heure. — Mais nos ladières du Léman sont cependant très sensibles, et parfois assez fortes pour gêner les manœuvres des bateaux à vapeur et des barques dans certains points d'abordage, aux débarcadères de St-Prex et de St-Sulpice, par exemple.

(1) Bull. S. V. S. N. III, 151.

Ces courants sont parfois très nettement limités ; si l'œil est assez élevé au-dessus de l'eau, il en voit les bords fort bien tracés. Souvent, des amas d'écumes et de poussières aquatiques signalent de loin les rives du courant. Si l'on s'approche en bateau de la limite de ces forts courants, on distingue sur l'eau des remous et tourbillons plus ou moins bien marqués.

On peut constater parfois une différence assez forte de température entre les eaux du courant et celles du lac immobile dans lequel il s'avance ; d'après mes notes, cette différence peut aller jusqu'à un demi degré et plus.

Les courants sont, les uns superficiels, et alors ils sont facilement apparents, les autres profonds, et alors ils ne nous sont qu'accidentellement révélés. Voici ce que je trouve raconté par La Bèche dans son expédition de sondage de 1819 [1] : « Les sondes ont été prises avec une masse de plomb de 8 livres ; elle était assez lourde pour résister aux courants. Ces courants m'ont semblé rares ; et ceux que j'ai observés étaient peu rapides, excepté dans une sonde de 80 brasses, vis-à-vis de la pointe de Dranses, où à la surface, on n'apercevait aucun courant sensible ; à la profondeur de 15 brasses, un courant emportait rapidement mon thermomètre à l'ouest ; et lorsque j'eus filé 10 brasses de plus de corde, j'aperçus que le courant emportait presqu'aussi rapidement à l'est. Ni l'un, ni l'autre, ne durèrent longtemps, car en filant 12 brasses de corde de plus, le thermomètre ne parut plus influencé par aucun courant. Je questionnai souvent mes bateliers sur ces courants ; tout ce que j'en ai appris, c'est qu'ils sont très



(Fig. 103.) Six positions des bouées-signaux de Morges, déplacées par les courants. *a* repère sur la côte de Savoie.

[1] [Loc. cit., T. I, p. 30.]

irréguliers, et qu'ils se portent assez indifféremment vers toutes les plages. »

Je trouve fréquemment dans mes notes l'indication de perturbations analogues. J'ai souvent été gêné, dans mes expériences, par les courants profonds, comme le fut jadis La Bèche.

Sachant combien les courants du lac sont irréguliers et échappent à toute espèce de loi apparente, je leur ai voué peu d'attention. J'ai cependant profité d'une circonstance favorable pour essayer de les étudier un peu mieux. En juin 1891, nous avions à Morges le Tir cantonal vaudois; il s'agissait d'écarter les bateaux de la ligne de tir et de marquer par des bouées les limites de la zone dangereuse. Cinq radeaux, entr'autres, furent ancrés dans le lac, de 500 en 500 mètres, sur une ligne droite partant du port et traversant dans la direction d'Amphion ; le fil de métal qui les fixait au fond était assez lâche pour leur permettre un déplacement de quelques mètres sous l'action des courants de surface. Pendant les 15 jours où ils ont été en place, je les ai visés du même point de la rive et j'ai dessiné sur mes notes les figures différentes que donnaient les signaux superposés des 5 radeaux ; j'ai obtenu ainsi une vingtaine de dispositions diverses, dont je reproduis, dans la figure 103, quelques-unes des plus caractéristiques. Une maison *a*, de la côte savoyarde, établissait l'alignement général de la série.

N° 1. 22 juin 1891, 17^{h}, par un léger morget, donne l'alignement correct des 5 signaux.

N° 2. 23 juin, 12^{h}, léger rebat, montre un courant chassant à gauche le 2e signal à 400^{m} de la rive.

N° 3. 24 juin, 6^{h}, morget, fait voir la dérive à gauche de la 3e bouée.

N° 4. 24 juin, 18^{h}, calme plat ; le 2me signal était chassé à gauche, le 3me à droite.

N° 5. 26 juin, 19^{h}, la 3me bouée était fortement entraînée à gauche.

N° 6. 27 juin, 17^{h}, joran. Les 2me et 3me signaux étaient chassés l'un et l'autre à gauche ; tandis que, dans tous les cas précédents, le courant était étroit et ne déplaçait qu'une seule bouée, dans ce cas il mesurait plus de 500^{m} de large, et enveloppait deux des radeaux de signal.

Ces exemples montrent la grande irrégularité des courants. Peut-être si j'avais pu poursuivre plus longtemps l'observation, serais-je arrivé à y démêler des lois. Peut-être aussi, par une étude prolongée devant un cap saillant où les courants sont relativement plus forts, pourrait-on déterminer les conditions du développement et des allures de ces déplacements de l'eau.

Je recommande cette étude aux personnes en position de la faire utilement.

SEPTIÈME PARTIE

THERMIQUE

La température d'un lac varie d'une région à l'autre et d'une couche à l'autre ; elle est soumise à des variations de périodicité régulière, soit journalières soit annuelles, à des variations de périodicité irrégulières que j'appelle cycliques, en analogie avec des variations de même ordre que nous avons constatées dans la hauteur des eaux du lac.

Pour introduire à l'étude méthodique de ces phénomènes compliqués, je traiterai d'abord les conditions thermiques générales de l'eau d'un lac ; puis je décrirai les faits de cet ordre dans le Léman.

I. THÉORIE GÉNÉRALE DE LA THERMIQUE D'UN LAC

Les eaux d'un lac sont soumises à des variations de chaleur résultant de l'absorption ou de l'émission calorique des corps qui l'entourent de près ou de loin, ou qui sont enfermés dans ses couches.

Les gains de chaleur lui viennent.

a. De la chaleur émise directement par le soleil.

b. De la chaleur rayonnée par l'atmosphère ambiante et les côtes élevées qui bordent le lac.

c. De la chaleur transmise par contact avec l'atmosphère superposée.

d. De la chaleur latente dégagée par la condensation de vapeur d'eau à la surface du lac.

e. De la chaleur apportée par l'eau des divers affluents (rivières et pluies).

f. De la chaleur développée par transformation du travail mécanique du vent.

g. De la chaleur développée dans les phénomènes biologiques de la vie des animaux et végétaux et de la putréfaction, ou dans les réactions chimiques qui se passent entre les substances dissoutes dans l'eau du lac.

h. De la chaleur centrale de la terre transmise par conduction dans le plafond du lac.

Les pertes de chaleur ont lieu :

a. Par rayonnement dans l'espace cosmique et dans l'atmosphère.

b. Par contact avec une atmosphère froide.

c. Par la chaleur latente absorbée dans l'évaporation de la surface.

d. Par la chaleur latente absorbée pour la fusion de la neige et de la grêle tombées dans le lac.

e. Par apport d'eau froide des divers affluents (rivières, pluies, etc).

Quant aux voies diverses de ces échanges thermiques nous prouverons que :

A. Sur son lit, le lac ne peut que se réchauffer par transmission de la chaleur centrale de la terre.

B. Dans ses couches moyennes, l'eau des affluents peut descendre et se mettre en équilibre thermique avec l'eau du lac. Nous verrons que cette action peut dans certains cas réchauffer, dans d'autres refroidir le lac.

C. Par sa surface supérieure, le lac tantôt se réchauffe, tantôt se refroidit. C'est par cette surface de contact avec l'atmosphère que se font les échanges thermiques les plus importants.

Il y a donc d'une part des actions nombreuses qui tendent à différencier au point de vue thermique les diverses couches et les diverses régions du lac. Mais d'une autre part, cette différenciation tend sans cesse à être annulée; les eaux plus chaudes tendent à réchauffer les eaux plus froides et vice-versa ; il y a tendance à revenir à l'uniformisation de la température. L'action d'uniformisation se produit dans l'intimité des masses d'eau du lac par deux ordres de phénomènes :

Ou bien des phénomènes de *conduction*, propagation de la chaleur

d'une couche à l'autre, sans qu'il y ait déplacement des masses d'eau; ou bien des phénomènes de *convection* dans lesquels certaines masses d'eau se déplacent et vont se loger entre des couches de température différente. La convection est d'origine thermique lorsque le déplacement se fait par suite des changements de densité dus au réchauffement ou au refroidissement d'une couche d'eau; la convection est d'origine mécanique lorsqu'elle provient d'une impulsion extérieure.

Dans les phénomènes de conduction, il y a uniformisation de la chaleur par transmission moléculaire; dans les phénomènes de convection, par action de mélange.

La propagation de la chaleur dans une masse d'eau douce, et son état d'équilibre thermique sont réglés par les propriétés physiques de l'eau. Nous signalerons à ce propos :

1° L'extrême mobilité des molécules liquides qui permet à l'eau de se stratifier en couches superposées suivant l'ordre de leur densité. Sitôt que pour une cause quelconque une couche d'eau s'alourdit, elle descend et va chercher un lieu où elle se loge entre des couches de même densité qu'elle. Nous n'avons pas à faire intervenir l'action opposée, la montée de couches plus légères, les actions qui pourraient la provoquer dans le lac étant d'efficacité infiniment faible. Nous donnerons plus loin, le tableau des densités de l'eau aux diverses températures d'après lequel se fait le procès de déplacement des eaux sous les actions thermiques *(convection thermique)*.

Nous avons vu, page 3, à propos de la pression hydrostatique que la densité de l'eau s'accroît rapidement avec la profondeur; que sous une pression de une atmosphère elle augmente de 50 millionnièmes, 0.000 05; que sous 30 atmosphères elle doit être de 1 $^1/_2$ millième. 0.0015 plus forte qu'à la surface. Cette variation est très importante; elle égale presque en valeur les variations de densité dues à la chaleur, qui dans les températures représentées dans le lac sont

à 4° densité	1.000 20
à 25° densité	0.997 60
différence :	0.002 60

N'y a-t-il pas lieu de tenir compte de ce fait pour la question de la convection thermique?

Si nous supposons de l'eau chaude, disons à 10°, sa densité essentielle étant 0.999 98

si nous la transportons au fond du lac où elle est soumise à une pression de 30 atmosphères, sa densité est accrue d'une valeur de 0.001 50
et devient 1.001 48

Elle devient plus dense que de l'eau à 4° qui serait à la surface et dont la densité monterait à 1.000 20

Nous pourrions semble-t-il avoir le paradoxe hydrostatique d'une eau froide superposée à une eau chaude et dans un état d'équilibre stable, le tout dans les conditions de la stratification directe[1]. Cet état paradoxal pourrait-il se développer dans un lac ? Si oui, toute la théorie des courants de convection, en particulier la théorie que nous établirons bientôt du refroidissement automnal par descente dans la profondeur des couches de la surface, en est fondamentalement ébranlée.

Mais est-ce possible ? — Ce serait possible si le refroidissement superficiel était infiniment lent et si le pouvoir de conduction thermique de l'eau était infiniment grand. Alors le refroidissement se propageant d'une manière graduelle et ménagée dans la profondeur, l'on pourrait avoir des couches froides superposées aux couches chaudes, de telle manière que, de haut en bas, la progression de densité due à l'augmentation de pression fût toujours plus forte que la diminution de densité résultant de l'élévation de la chaleur. L'équilibre resterait stable et le paradoxe serait une réalité.

Mais ni l'une ni l'autre des deux hypothèses n'est exacte. Le refroidissement superficiel est puissant et rapide, et la conduction thermique dans l'eau est infiniment lente. Il en résulte que, par refroidissement, les couches supérieures augmentent rapidement de densité ; comme elles sont mobiles, elles descendent dans la profondeur ; à mesure qu'elles s'enfoncent, elles sont, elles aussi, soumises à l'accroissement de densité dû à l'augmentation de la pression ; pendant toute cette descente, elles sont soumises à la même pression, par conséquent à la même augmentation de densité que les couches avec lesquelles elles sont en contact, et c'est la différence de température qui seule détermine les relations hydrostatiques. Elles ne s'arrêtent donc dans leur descente que lorsqu'elles ont trouvé des couches de même température, et par conséquent de même densité qu'elles-mêmes.

Donc les phénomènes de convection thermique ne sont point

[1] Voir plus loin, page 296.

influencés par l'augmentation de densité résultant de l'accroissement de la pression dans les couches profondes. Le paradoxe hydrostatique que j'ai énoncé ne peut être représenté dans un lac.

Il en est autrement lorsqu'il y a dans un lac superposition de couches de densités différentes, par le fait d'une teneur plus ou moins riche en matières dissoutes. Les couches profondes peuvent être assez minéralisées pour qu'elles restent plus lourdes que les eaux de surface, même très refroidies. On peut alors avoir la stratification paradoxale d'eaux plus froides, intercalées entre des eaux de surface et des eaux de fond plus chaudes. M. A. Delebecque a découvert un exemple très intéressant d'une telle stratification dans le lac de la Girotte, arrondissement d'Albertville (Savoie) [1]. En juillet 1892, ce lac avait :

à la surface	17°
à 25m	5°
à 100m	7°

Le paradoxe thermique est donc possible. Mais il ne nous touche pas pour le Léman, les différences de composition des eaux étant certainement trop faibles pour y amener un tel effet.

Nous traiterons plus loin des déplacements d'ordre hydrostatique résultant de la surcharge de certaines eaux par l'alluvion qu'elles tiennent en suspension *(convection hydrostatique)*.

2° Cette même mobilité des molécules liquides permet à l'eau de se déplacer sous des impulsions mécaniques actives, celle du vent par exemple, et peut occasionner, par les courants, des mélanges de couches de températures différentes *(convection mécanique)*.

3° La diathermanéité de l'eau qui permet la pénétration ou l'émission de la chaleur rayonnante, non seulement par le plan de surface supérieure, mais par les couches sous-jacentes. La diathermanéité de l'eau est faible ; de tous les liquides étudiés par Melloni, elle est celui qui laisse passer le moins les radiations thermiques *(conduction diathermique)*. Par conséquent, la surface du lac subit des variations considérables par suite de la chaleur rayonnante, les couches moyennes et profondes des variations très faibles ou nulles.

D'après les recherches de J.-L. Soret, la diathermanéité de l'eau est plus grande pour la chaleur lumineuse que pour la chaleur obscure ;

[1] C. R. Acad. sc. Paris, t. CXVI, p. 700, 1893.

les couches moyennes de l'eau se refroidissent donc moins par radiation qu'elles ne se réchauffent par l'action rayonnante du soleil.

J'ai voulu me rendre compte de cette propriété de l'eau de laisser passer en partie la chaleur lumineuse. Pour cela j'ai noirci la boule d'un thermomètre et je l'ai enfermé dans un ballon de verre plein d'air; puis j'ai fait descendre l'appareil dans le lac, à 1.0^{m} sous la surface, en le laissant exposé aux rayons du soleil. J'ai vu sa température monter notablement au-dessus de celle de l'eau ambiante. J'ai obtenu entre autres les valeurs suivantes pour l'excès de température du thermomètre noirci, à un mètre de profondeur, protégé par son bain d'air contre le contact avec l'eau :

		Température de l'eau	Excès de température du thermomètre noirci
27 mars 1871	10^{h}	6.9°	6.1°
25 juillet 1873	17^{h}	22.2	7.8
26 — —	15^{h}	23.5	8.4
1 août —	12^{h}	24.0	4.2

4° La conductibilité thermique de l'eau est très faible; c'est avec une très grande lenteur que la chaleur se propage dans une eau immobile *(conduction thermique)*. M. le professeur F.-H. Weber, à Zurich, a déterminé le coefficient de la conductibilité de l'eau et l'a fixé à 0.0745, tandis que pour le mercure il est de 0.91 (1). De la valeur de ce coefficient, M. Weber a tiré la vitesse de la propagation de la chaleur dans l'eau ; il estime qu'en 24 heures la chaleur ne peut pas se propager par conductibilité à plus de 0.3^{m}, en une année à plus de 6^{m}. (2)

5° L'eau possède une capacité calorique ou une chaleur spécifique considérable ; il faut une quantité relativement grande de chaleur pour élever sa température d'un degré. La chaleur spécifique de l'eau est la plus forte des corps connus ; elle est de 3 à 20 fois plus grande que celle des métaux ; à volume égal elle est 3000 fois plus grande que celle de l'air.

6° L'eau pure présente un maximum de densité entre 3.9° et 4.0°C., de telle sorte que, à partir de ce point, l'eau devient plus légère, soit

(1) Vierteljahreschrift der Zürcher nat. Ges. XXIV, 252, sq. 1879.

(2) Communication verbale.

qu'elle se réchauffe, soit qu'elle se refroidisse : l'eau la plus lourde est celle de 4°.

7° L'eau à l'état solide a une densité plus faible que celle de l'eau à 0° ; on l'évalue à 0.92. La glace flotte donc sur l'eau à 0°.

Ces diverses propriétés de l'eau président aux conditions thermiques d'un lac. Essayons de caractériser celles-ci dans leurs traits généraux.

Nous considérons ici un lac d'eau physiquement pure, non surchargée par l'alluvion en suspension ; nous traiterons dans un autre paragraphe de ce cas spécial.

Nous pouvons négliger l'action de réchauffement de la chaleur centrale de la terre sur le fond du lac. D'après les dernières recherches (1), la chaleur qui se dégage à travers les couches de la terre suffirait à fondre annuellement une couche de 5.2^{mm} de glace recouvrant la surface du globe. A 80 calories pour la chaleur latente de fusion de la glace, cela représenterait la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° une couche d'eau de 0.41^{m}, ou de un dixième de degré une couche d'eau de 4.1^{m}. C'est une valeur absolument insignifiante comparativement aux autres actions thermiques qui interviennent dans les lacs.

Nous laisserons de côté ici les causes de réchauffement intime que nous avons énumérées sous les lettres *f* et *g*, page 290 (chaleur développée par l'épuisement du travail mécanique du vent, et chaleur développée par les phénomènes biologiques), de même la chaleur développée ou dégagée par les phénomènes de condensation et d'évaporation à la surface, ainsi que par les chutes d'eau pluviale plus chaudes ou plus froides que l'eau du lac. Leur importance est trop minime, ou échappe trop à notre appréciation.

Nous n'avons à considérer ici que les faits thermiques portés sur la surface supérieure du lac par l'action du soleil et de l'atmosphère, et du rayonnement dans l'espace ; leur importance est seule décisive.

Par le fait de la mobilité du liquide, le lac est toujours stratifié en couches telles que les plus denses soient au fond, les plus légères à la surface.

(1) Report on the rate of increase of underground temperature. British Association, LII Meeting, Southampton 1882, p. 74, London 1883.

Par le fait du maximum de densité de l'eau douce, la stratification a des allures opposées suivant que la chaleur de l'eau est supérieure ou inférieure à 4.0°. Quand la température du lac est plus élevée que le maximum de densité, les couches les plus chaudes sont au-dessus des couches les plus froides. Cet état, qui est conforme à la disposition normale des couches d'un liquide quelconque, est ce que j'appelle la *stratification thermique directe*; quand le lac est plus froid que 4.0°, les couches plus froides sont superposées aux couches plus chaudes, et nous avons alors la *stratification inverse*. Dans ces deux cas, l'équilibre est stable. Cette température critique du maximum de densité de l'eau douce, a une telle importance dans la physique des lacs, que nous n'hésitons pas à désigner sous les appellations *d'eaux chaudes* et *d'eaux froides*, celles qui sont plus chaudes ou plus froides que 4°0. Cela nous abrègera un peu les descriptions.

Les échanges thermiques ayant lieu presque uniquement à la surface supérieure du lac, on peut admettre que, dans un lac suffisamment profond, il subsisterait, dans les grandes profondeurs, une couche immobile à 4°, maximum de densité de l'eau ; au-dessus de cette couche, si le climat de la région le commande, il s'établit des couches à température variable, à stratification directe pendant la saison chaude, à stratification inverse pendant la saison froide.

Les actions thermiques extérieures au lac tendent à le réchauffer ou à le refroidir, à lui livrer du calorique ou à lui en enlever. Par suite de la grande capacité calorique de l'eau, plus grande que celle de l'air, les variations thermiques seront plus rapides dans l'atmosphère que dans le lac ; la température de l'air se réchauffera plus vite, se refroidira plus vite que celle du lac. Le lac retardera donc sur les variations climatiques [1] de la région, les variations thermiques se feront d'abord sentir dans l'air, puis plus tard dans l'eau. Quoi qu'il en soit de ce retard, le lac sera soumis à des variations de même signe que celles de l'air ; il participera aux variations périodiques du climat, aussi bien à la période de l'année qu'à celle du jour ; il subira un réchauffement diurne et un refroidissement nocturne, un réchauffement estival et un refroidissement hivernal. Ces deux courbes se superposeront l'une à

[1] Fatigué de la longueur et de la lourdeur du mot *climatologique*, dans l'impossibilité d'appliquer le mot *climatérique*, qui a une toute autre signification (CLIMATÉRIQUE, qui appartient à un des âges de la vie regardés comme critiques, Littré), je me décide à créer le mot *climatique* ; il n'a pas besoin de définition.

l'autre, la variation journalière étant beaucoup moins intense, et pénétrant moins profond que la variation annuelle.

Ces actions de réchauffement ou de refroidissement tendront, selon les circonstances, à développer et perfectionner la stratification thermique, ou bien à l'annuler.

Il y a donc à considérer deux procès, celui de stratification et celui d'uniformisation thermique du lac.

Procès de stratification. Un lac à eaux chaudes reçoit de la chaleur par sa surface ; un lac à eaux froides perd de la chaleur. Dans les deux cas, les eaux supérieures, déjà plus légères que les eaux sous-jacentes, perdent encore de leur densité ; la stabilité de l'équilibre en est accrue ; la stratification thermique, directe ou inverse, se développe ou se perfectionne.

Procès d'uniformisation. Un lac à eaux chaudes se refroidit par sa surface ; la couche supérieure, en perdant de la chaleur, se contracte, devient plus lourde, tombe dans la profondeur et est remplacée par la seconde couche qui subira bientôt le même sort. Ce procès est un peu compliqué : illustrons-le par un exemple.

Soit une série de couches *A*, *B*, *C*, *D*, etc., de température de 10°, 9°, 8°, 7°, etc., superposées en stratification directe :

A	10°
B	9°
C	8°
D	7°
E	6°

La couche supérieure *A* perd de la chaleur, elle devient plus froide que la 2e couche *B* ; disons qu'elle s'abaisse à 8° 1/2. Devenue plus lourde que la couche *B*, elle descendra et se logera entre *B* et *C*, et nous aurons la superposition suivante :

B	9°
A	8° 1/2
C	8°
D	7°
E	6°

Mais la couche B se refroidit à son tour, et tombe à une température inférieure à celle à laquelle est descendue la couche A, disons à $8^{\circ}\ 1/4$. Le courant de convection thermique fera écouler la couche B qui reprendra sa place originelle et nous aurons la superposition suivante :

A	$8^{\circ}1/2$
B	$8^{\circ}1/4$
C	8°
D	7°
E	6°

Ce procès se renouvellera entre les couches A et B jusqu'à ce que toute leur épaisseur soit descendue à la température de 8°, égale alors à la couche C.

Quand nous aurons la superposition thermique

A, B, C	8°
D	7°
E	6°

le même jeu se reproduira comme au début, seulement la première couche formée de A, B et C, diffèrera de A en ce qu'elle sera plus épaisse, s'étant annexé les couches B et C, et en ce qu'elle sera plus froide, l'ensemble étant descendu à la température de la troisième couche.

Dans ce procès de refroidissement, la couche supérieure s'épaissit progressivement en s'annexant par mélange ou convection verticale les couches immédiatement sous-jacentes, à mesure qu'elle abaisse sa température au degré de celles-ci.

Cette couche supérieure d'épaisseur progressivement croissante peut être considérée comme ayant une température uniforme dans toute sa hauteur. Le procès de refroidissement dans le type de stratification directe est donc caractérisé par l'annulation, ou la destruction de cette stratification. C'est ce que j'appelle le procès d'uniformisation. Il en est exactement de même, mais avec des signes opposés, dans

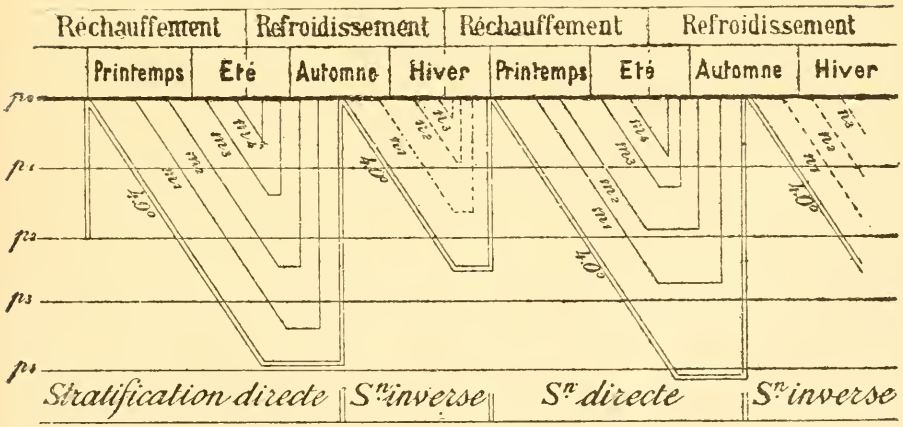
une eau froide, à stratification inverse, lorsqu'elle se réchauffe par la surface supérieure.

Nous avons donc les deux mêmes procès, aussi bien dans les eaux chaudes que les eaux froides, mais sous l'influence d'actions opposées :

	Type de stratification.	Action.	Procès.
Eaux chaudes :	Str. directe	réchauffement	stratification.
		refroidissement	uniformisation.
Eaux froides :	Str. inverse	réchauffement	uniformisation.
		refroidissement	stratification.

Suivant donc que la saison amène le réchauffement ou le refroidissement du lac, suivant aussi que ces actions se produisent sur des eaux chaudes ou sur des eaux froides, les allures des phénomènes intimes de la thermique du lac et l'état d'équilibre de ses couches seront différents.

Je vais essayer de représenter ces allures d'une manière graphique en supposant un lac dont la température varie de l'été à l'hiver au-dessus et au-dessous de la température critique de 4° 0, dont les eaux sont alternativement chaudes et froides. Je ferai dans ce lac, à chaque



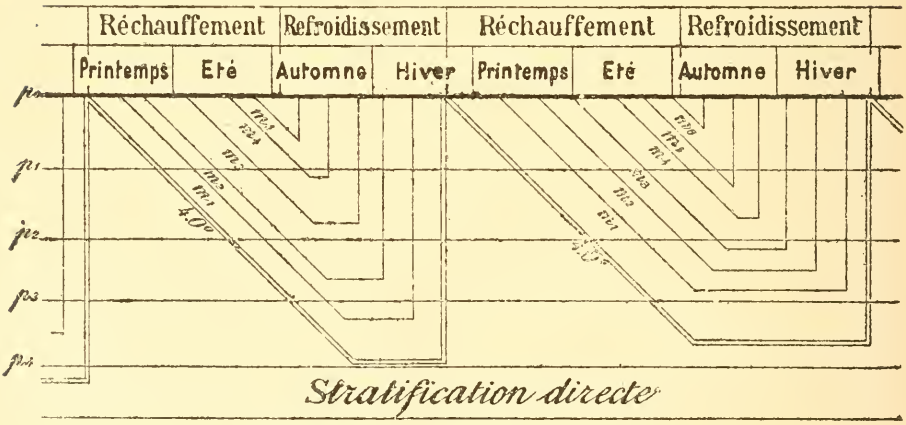
(Fig. 104.) Schéma thermique d'un lac tempéré.

mois de l'année, des séries de sondages thermométriques depuis la surface jusqu'aux plus grands fonds, et j'en fixerai les résultats dans

une suite de colonnes verticales qui représenteront les saisons successives. Les couches superposées du lac seront indiquées par les strates p_1, p_2, p_3, etc., la surface étant p_0. Je réunirai par des courbes les points où les sondages successifs me donneront les mêmes températures (courbes isothermes) ; je figurerai par des lignes pleines les isothermes des eaux chaudes, par une double ligne l'isotherme de 4°0, par des lignes ponctuées les isothermes des eaux froides. Cela me donnera le schéma de la figure 104 ; les isothermes des eaux chaudes m_1, m_2, m_3 et celles des eaux froides n_1, n_2, n_3 représentant des températures d'autant plus rapprochées de 4°0 que l'indice est plus faible.

Le procès de stratification s'exprime dans ce schéma par l'obliquité des lignes isothermes qui descendent de plus en plus dans des couches plus profondes ; le procès d'uniformisation par la verticalité des isothermes qui remontent vers la surface.

Ce schéma nous montre que, tandis qu'à la surface la température s'accroît et décroît lentement et progressivement au-dessus et au-dessous du point critique de 4°, sans être influencée en rien par ce maximum de densité de l'eau, dans les couches profondes, les lignes isothermes subissent des inflexions compliquées par le fait des inversions dans le type de la stratification thermique.



(Fig. 105.) Schéma thermique d'un lac tropical.

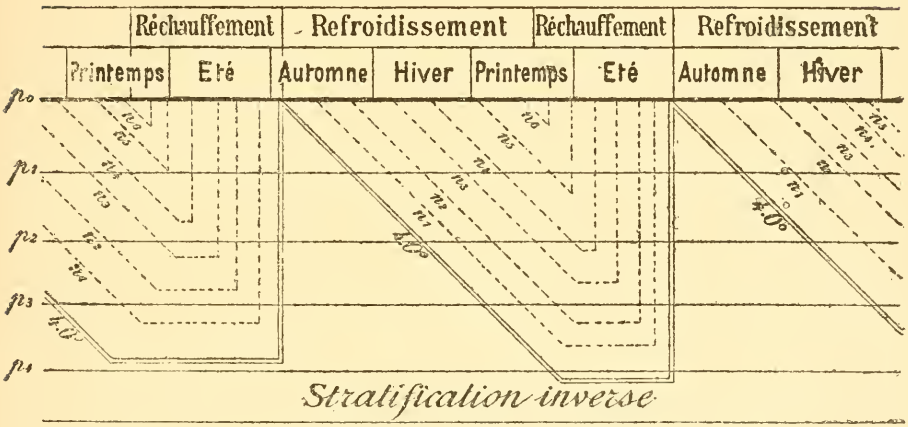
Mais il n'en est pas partout de même. Dans les climats extrêmes, la chaleur du lac peut ne pas être appelée à franchir la température

critique du maximum de densité ; les allures sont alors beaucoup plus simples.

Dans les contrées tropicales, le lac peut ne pas s'abaisser au-dessous de 4° et alors le schéma thermique sera celui de la fig. 105, où j'ai conservé la même notation.

L'eau salée se distingue de l'eau douce en ce qu'elle n'a pas de maximum de densité au-dessus de la température de 0°. Les lacs d'eau salée (lacs sans émissaire) auront donc un type thermique qui sera analogue à celui de nos lacs tropicaux.

Dans les contrées polaires, au contraire, dans le trop court été et par le triste réchauffement que donnent les rayons d'un soleil très bas sur l'horizon, le lac peut ne pas se relever au-dessus de 4° ; son schéma thermique prendra la forme de la figure 106.



(Fig. 106.) Schéma thermique d'un lac polaire.

Ces trois types généraux comprennent toutes les possibilités. Pour les appliquer aux cas spéciaux, il n'y a qu'à y faire entrer la notion de la profondeur du bassin, comme nous le verrons plus loin, et à régler la position et l'inclinaison des isothermes d'après les faits d'observation.

On peut en trouver deux exemples dans les planches III et IV du vol. III des Archives de Genève, 1880, dans lesquels j'ai figuré de cette manière la température du lac de Thoune en 1848, d'après les sondages thermométriques de C. Brunner et Fischer-Ooster et celle

du lac Léman en 1879, d'après mes propres recherches [1]. Je reprendrai plus loin ce sujet à propos des faits d'observation du Léman.

En analysant ces schémas, on reconnaîtra que la température des couches profondes des lacs aura des allures très différentes suivant les conditions géographiques de la contrée et cela permet une classification naturelle des lacs, que nous diviserons en :

1° Lacs de *type tropical,* dont les couches profondes varient à partir et au-dessus de la température du maximum de densité de l'eau, 4°.

2° Lacs de *type tempéré,* dont les couches profondes varient soit au-dessous soit au-dessus de 4°.

3° Lacs de *type polaire,* dont les couches profondes varient à partir et au-dessous de 4°.

Le type thermique exprime donc la nature des variations de température des couches profondes du lac.

Si nous superposons les tracés de ces trois types du lac, en les ordonnant de la même manière par rapport aux saisons de l'année, comme nous l'avons fait dans la planche VII, page 304, nous voyons que les périodes d'établissement de la stratification thermique, et celles d'annulation et d'uniformisation de cette stratification ne correspondent point aux mêmes saisons. L'eau se stratifie thermiquement, la stratification thermique se perfectionne, ce qui dans nos schémas s'exprime par la descente des lignes isothermes :

dans les lacs tropicaux depuis la fin de l'hiver, pendant tout le printemps, jusqu'à la fin de l'été.

dans les lacs tempérés en été et en hiver.

dans les lacs polaires depuis la fin de l'été, pendant tout l'automne, jusqu'à la fin de l'hiver.

L'eau s'uniformise, la stratification thermique s'annule, ce qui dans mes schémas s'exprime par l'ascension verticale des lignes isothermes :

dans les lacs tropicaux depuis la fin de l'été, pendant tout l'automne jusqu'à la fin de l'hiver.

dans les lacs tempérés au printemps et en automne.

dans les lacs polaires depuis la fin de l'hiver, pendant tout le printemps jusqu'à la fin de l'été.

[1] *F.-A. Forel.* Températures lacustres, etc. Arch. de Genève, III, 501 et IV, 89, 1880.

Les allures de la stratification thermique sont donc assez différentes dans ces types pour que je sois parfaitement justifié si je les sépare dans une classification rationnelle.

Quels sont les facteurs géographiques qui fixent la place de chaque lac dans l'un ou l'autre de ces types? Ce sont essentiellement :

A. La position en latitude : l'inclinaison plus ou moins grande des rayons solaires détermine leur pénétration dans les eaux et règle la quantité de chaleur que le lac reçoit directement du foyer calorique central de notre système cosmique. La latitude a en même temps une grande influence sur le climat, d'où dépendent les facteurs décisifs de la température du lac, à savoir, la température de l'air, son humidité, sa nébulosité, son agitation par les vents, etc.

B. L'altitude de la surface du lac est le second grand facteur du climat ; elle aura en conséquence une action considérable sur les échanges de température entre l'eau et l'air. Elle peut avoir un effet assez puissant pour que certains lacs de haute montagne dans nos régions tempérées arrivent à présenter le type polaire.

C. La profondeur du lac, d'où dépend la masse de ses eaux, joue un rôle bien marqué que nous devons analyser. Dans le cadre des trois types que nous avons établis, c'est elle qui donne à chaque lac son individualité particulière, qui fait que chaque lac a son caractère thermique spécial. On sait — et nous justifierons amplement cette affirmation quand nous étudierons en détail le lac Léman, — que la chaleur gagnée par le lac ne reste pas cantonnée dans la couche superficielle et supérieure ; la diathermanéité de l'eau d'une part, les courants de convection mécanique et hydrostatique d'une autre part font pénétrer la chaleur dans les couches moyennes et même profondes du lac. Nous avons déjà vu que les pertes de chaleur se répartissent de même sur toute l'épaisseur du lac par les courants de convection thermique dont nous avons indiqué les allures. Il y a donc mélange thermique de la surface vers le fond et du fond vers la surface, mélange auquel plus ou moins toute la masse du lac participe. En conséquence, un lac de grande profondeur peut répartir ses gains et pertes de chaleur sur une grande masse d'eau ; un lac de faible profondeur ne les répartit que sur une masse restreinte. Dans le premier cas, les mêmes gains de chaleur élèveront relativement peu la température de la surface, les pertes de chaleur abaisseront peu sa température ; l'amplitude des variations thermiques y sera peu considérable. Dans le second cas,

elle sera plus forte et plus étendue. Nous avons donc à tenir un compte important de la profondeur moyenne du lac, car c'est d'elle que dépend, toutes choses égales d'ailleurs dans les faits climatiques, l'amplitude des variations thermiques du lac.

Ajoutons comme règle pratique que cette amplitude des variations thermiques s'apprécie très simplement par la recherche du maximum de température de la surface du plein lac, en été, et du minimum de l'hiver. La différence entre ces deux chiffres est précisément la valeur de la variation thermique. La position de ces chiffres par rapport à la température du maximum de densité établira le type auquel appartient le lac en question. Par conséquent, ma classification en trois types thermiques exprime non seulement l'état de la température des couches profondes, mais encore celui de la surface. Citons en des exemples :

Le lac Titicaca, dans les Andes du Pérou, par 16° lat. S., à une altitude de plus de 3800^{m}, avec une profondeur maximale de 282^{m}, présentait lorsque M. Alexandre Agassiz (1) l'a sondé en 1876 une température abyssale de 10°6, la surface étant à 13°5. S'il est permis de conclure d'observations aussi peu nombreuses,

le minimum d'hiver serait	10°
le maximum d'été	14°
l'amplitude de la variation thermique	4°

la stratification thermique serait toujours directe et le lac de type tropical.

Le Léman a pour maximum d'été	23°
pour minimum d'hiver	4°
l'amplitude de sa variation thermique est	19°

Il appartient au type des lacs tropicaux qui restent constamment au-dessus de 4° et dont la stratification thermique est toujours directe.

Le lac de Morat, beaucoup moins profond, d'altitude plus considérable et de latitude plus septentrionale, a

pour maximum d'été	25°
pour minimum d'hiver	0°
l'amplitude de sa variation est	25°

(1) *Al. Agassiz.* Hydrographical sketch of lake Titicaca. Proceed of americ. Acad. of arts and sc. XI, N° XXIV, 283, 1876.

Il appartient au type des lacs tempérés dont la température oscille au-dessus et au-dessous de 4°, et dont la stratification thermique est tantôt directe, tantôt inverse.

Un lac du Grönland ou de la terre de François-Joseph, dans les régions arctiques, aurait

pour maximum d'été	4°
pour minimum d'hiver	0°
l'amplitude de sa variation thermique serait	4°

Il appartiendrait au type des lacs polaires dont la température est toujours inférieure à 4°, et dont la stratification thermique est toujours inverse.

Le lac du Doménon d'Amont à l'altitude de 2.400m, dans le massif de Belledonne, Isère, avait (1), à la date du 9 juillet 1893, une température de surface de 3°6. M. Delebecque, en communiquant ce résultat, classe ce lac dans le type de nos lacs polaires (2) ; il serait, en effet, possible que ce lac de haute montagne n'élevât pas sa température au-dessus de 4°.

Ces trois types généraux comprennent toutes les possibilités au point de vue de la stratification thermique. Nous avons cependant à y introduire une division en deux groupes, suivant la profondeur du lac. En effet :

ou bien le lac est très profond, et alors les variations thermiques annuelles ne se propagent pas dans ses couches abyssales qui restent relativement constantes. (Je dis relativement, car nous verrons que même ces couches abyssales peuvent être soumises à certaines variations cycliques.) Je les appellerai *lacs à température abyssale constante ;*

ou bien le lac est peu profond et les variations annuelles se manifestent dans toute l'épaisseur du lac, *lacs à température abyssale variable.*

Par profondeur, j'entends ici la profondeur moyenne du lac et non sa profondeur maximale. En effet, nous nous occupons de la variation de température de l'eau, de l'emmagasinement de la chaleur pendant la saison chaude, du départ de la chaleur pendant la saison froide ; le rapport entre la superficie du lac, organe du gain ou de la perte de la chaleur, et le volume de l'eau dans laquelle la chaleur s'accumule,

(1) Archives de Genève, XXX, 665, 1893.

(2) Nouvelles géographiques du Tour du Monde, p. 35, 3 mars 1894.

joue ici le rôle prédominant. Or ce rapport s'exprime par la profondeur moyenne du lac. Un lac à talus verticaux et à fond horizontal, de grand volume par conséquent par rapport à sa superficie, subira, toutes choses égales d'ailleurs, des variations thermiques abyssales moins considérables qu'un lac de même profondeur maximale, mais en forme d'entonnoir, et de volume relativement plus faible. (1)

Cette division en deux groupes peut se retrouver dans nos trois types de stratification thermique des lacs :

Pour les lacs profonds, les lacs tropicaux auront une température abyssale supérieure à 4°, les lacs tempérés égale ou presqu'égale à 4°, les lacs polaires inférieure à 4°.

Quant aux lacs peu profonds, leur température abyssale sera d'autant plus variable, caeteris paribus, que leur profondeur est moindre.

Cela étant, nous aurons 6 classes générales dans lesquelles nous pourrons faire rentrer tous les lacs possibles :

Types	Profondeur	Température abyssale	Exemples
Lacs tropicaux	grande	4° ou > 4°	Léman, Lario, Verbano.
	faible	> 4°	. . . . .
Lacs tempérés	grande	4°	Bodan.
	faible	< 4° à > 4°	Morat.
Lacs polaires	grande	4° ou < 4°	Doménon d'Amont.
	faible	< 4°	. . . . .

Dans ces classes, chaque lac représentera un type individuel suivant les conditions climatiques auxquelles il est soumis et suivant sa profondeur moyenne plus ou moins grande. Chaque lac a son caractère thermique spécial, et mérite d'être étudié et décrit à ce point de vue.

II. LA THERMIQUE DU LÉMAN.

Le Léman est un lac de type tropical à température abyssale constante ; les variations annuelles ne se font pas sentir dans ses cou-

(1) L'entonnoir du Boubioz, avec ses 81m de profondeur, n'exerce par lui-même, abstraction faite de sa source thermale, aucune action thermique sur la grande masse du lac d'Annecy dont le plafond ne descend pas au-dessous de 65m. *A. Delebecque.* Atlas des lacs français. 1893.

ches profondes ; celles-ci ne sont soumises qu'aux variations cycliques, comme nous le verrons plus loin.

Nous alions faire l'étude de ses conditions thermiques en traitant successivement :

La température de surface de la région pélagique.

Les relations de la température pélagique avec la température et avec l'humidité atmosphérique.

La température de surface de la région littorale.

La réflexion de la chaleur à la surface du lac

La température de la région profonde.

La barre thermique littorale de l'hiver.

La congélation du lac.

La balance thermique.

I. Température de la surface du lac.

La surface du lac reçoit en premier les rayons solaires et absorbe la plus grande partie de leur chaleur ; elle est en contact avec l'atmosphère et en échange thermique continuel avec elle. C'est donc la surface du lac qui subit les variations de température les plus considérables ; c'est elle qui est le plus immédiatement abordable à l'observation ; c'est elle qui d'autre part influe directement sur le climat de la contrée. Son état thermique et ses variations sont du plus haut intérêt.

La température de la surface du lac est sensiblement différente en plein lac, dans la région pélagique d'une part, et sur les bords, dans le fond des golfes de la région littorale, d'autre part. Nous aurons donc à séparer l'étude de ces deux régions.

A. *Température de surface de la région pélagique.*

Nous ne possédons qu'une seule série systématique complète d'observations sur la température pélagique du lac Léman. Elles ont été exécutées pendant une année entière, à dater d'août 1851, par les physiciens de Morges, MM. F. Burnier, Ch. Dufour et Al. Yersin [1].

[1] *Ch. Dufour.* Résumé des observations météorologiques faites à Morges de 1850 à 1854. Bull. S. V. S. N. VI, 199. Lausanne, 1859.

Chaque jour, entre 13 et 14h, ils allaient plonger leur thermomètre à 1m de profondeur sous l'eau, à 1km en avant de Morges.

Je donne le tableau des moyennes mensuelles qu'ils ont déduites de leurs observations.

		Température pélagique — MORGES	Ecart de la température atmosphérique du mois avec la normale de Genève.
1851	août	19.2°	— 0.4°
	septembre	15.2	— 3.8
	octobre	13.2	— 0.6
	novembre	9.1	— 3.9
	décembre	6.5	— 2.3
1852	janvier	5.6	+ 2.3
	février	5.5	+ 1.2
	mars	5.7	— 2.2
	avril	7.0	— 0.9
	mai	11.6	— 0.2
	juin	14.6	— 1.7
	juillet	19.8	+ 0.5
Moyennes		11.9°	— 1.0°

Comme ces chiffres ne représentent qu'une seule année, j'ai essayé de prendre une idée de l'écart de la température de cette année avec une année normale. Pour cela, j'ai cherché dans les résumés d'E. Plantamour (1), les écarts de chaque pentade sur la température atmosphérique normale, et en tirant les moyennes, j'ai obtenu l'écart de chaque mois à Genève pour l'année considérée. Je donne les chiffres de cet écart dans la 2e colonne du tableau précédent. On y voit que tous les mois de cette année, sauf janvier, février et juillet 1852, ont été plus froids que la normale. Il est évident qu'un écart analogue s'est fait sentir dans l'atmosphère qui surmontait le Grand-lac ; que par conséquent les chiffres de la température du lac ont été probablement plus bas que la normale pendant la plus grande partie de l'année.

Mais une seule année d'observation ne suffit pas à donner la courbe normale d'une valeur météorologique. Nous n'avons pas de séries assez longuement prolongées de la température pélagique du Léman, et cependant c'est un facteur climatique si important pour notre contrée, que je dois essayer de l'apprécier au moins approximativement. Pour cela, je devrai suivre une marche un peu compliquée.

Nous possédons une très belle suite d'observations de la tempéra-

(1) Climat de Genève. I, 61, sq.

ture de l'eau mesurée dans le port de Genève (pont du Mont-Blanc à 1m de profondeur) (1). Commencées en 1853, elles se continuent encore actuellement (2). Les valeurs moyennes en ont été calculées par E. Plantamour pour la période 1853 à 1875 (3), soit pendant 23 ans, ce qui est suffisant pour effacer les écarts des variations accidentelles et périodiques simples. Nous discuterons plus loin la signification de la température de l'eau mesurée dans cette station ; mais il est évident qu'elle est fonction de la température générale du lac et qu'elle nous fournit une bonne base pour cette étude.

Voici les moyennes mensuelles de la température de l'eau du port de Genève, pour les années 1853 à 1875.

Janvier	5.11°	Juillet	18.09°
Février	4.96	Août	18.65
Mars	6.12	Septembre	17.07
Avril	8.78	Octobre	13.98
Mai	11.72	Novembre	9.63
Juin	15.34	Décembre	6.61

Partant de là, j'ai comparé individuellement toutes les mesures de température pélagique superficielle du lac et spécialement du Grand-lac que j'ai pu collecter et, en en tirant la différence avec celles de Genève, j'ai constaté qu'il y a des variations notables dans ces différences. Quelques-unes de ces variations sont accidentelles, dues en particulier à l'action des vents ou de phénomènes thermiques locaux ; mais, en plus des variations accidentelles, il reste évidemment une variation systématique, la température pélagique du lac étant tantôt plus élevée, tantôt moins élevée que celle de Genève, suivant les mois et les saisons. Cela étant, j'ai cherché à déterminer le sens et la valeur de ces variations systématiques ; pour cela j'ai réuni les différences en groupes mensuels, espérant que les variations accidentelles s'annuleraient entr'elles. Voici les séries d'observations qui ont servi de base à ce calcul et les résultats que j'ai obtenus :

1° De 1879 à 1886, j'ai mesuré moi-même la température pélagique du lac toutes les fois que j'avais l'occasion de naviguer sur ses eaux,

(1) Ces observations sont facilement abordables, publiées dans les cahiers mensuels des Archives de Genève.

(2) Tous les jours excepté les dimanches et jours fériés.

(3) Climat de Genève, II, 97.

soit en péniche, soit en bateau à vapeur. En comparant les résultats obtenus quand j'étudiais. avec toutes les précautions nécessaires, la température de l'eau à bord de ma péniche, avec ceux que me donnait la mesure prise à bord d'un bateau à vapeur en marche, j'ai reconnu que ces dernières avaient une précision suffisante et que je pouvais les utiliser. J'ai constaté entr'autres que l'agitation de l'eau, soit par la vague de refoulement, soit par les palettes du pyroscaphe, n'altéraient presque pas la température superficielle de l'eau.

J'ai retrouvé dans mes notes des observations faites dans 350 jours différents de ces sept années ; j'ai pris la différence entre la température pélagique ainsi obtenue et la température du port de Genève mesurée le même jour à midi, telle qu'elle est publiée dans les cahiers des Archives de Genève. Je les ai groupées par mois, et en en cherchant la moyenne, je suis arrivé à la correction à apporter mensuellement aux valeurs de Genève pour en tirer la température pélagique du Grand-lac. Le signe positif indique que la température du Grand-lac est plus élevée que celle du Rhône de Genève :

	NOMBRE DE JOURS	DIFFÉRENCE
Janvier	21	+ 1.3°
Février	34	+ 0.9
Mars	37	0.0
Avril	42	— 0.4
Mai	63	+ 0.7
Juin	46	+ 2.5
Juillet	19	+ 1.6
Août	11	+ 1.0
Septembre	8	+ 0.5
Octobre	21	+ 0.2
Novembre	22	+ 0.7
Décembre	26	+ 1.3

D'après cela les eaux du Grand-lac sont sensiblement plus chaudes que celles de Genève en hiver et en été ; elles sont de même température ou plus froides en automne et au printemps.

2° Dans l'été de 1886, j'ai demandé aux capitaines de quelques-uns de nos bateaux à vapeur de prendre des mesures thermométriques dans la traversée d'Ouchy à Evian, soit le matin et le soir, soit à midi. MM. Devaud, du *Chillon*, Milleret, du *Guillaume-Tell*, Tournier, du *Simplon*, ont eu l'obligeance de faire ces observations. J'ai fait la même comparaison que ci-dessus avec les températures du port de Genève, en utilisant pour la température pélagique du Grand-lac, ou bien les chiffres observés directement au milieu du jour, ou bien la moyenne

entre les observations de 7^h et de 18^h. Les moyennes des différences obtenues ainsi ont été :

1886	NOMBRE DE JOURS	DIFFÉRENCE
Juin	23	+ 2.9°
Juillet	26	+ 2.4
Septembre	4	+ 1.4

Les différences sont de même signe, mais un peu plus fortes que celles de la série précédente.

3° Nous avons inauguré en 1889 une nouvelle méthode générale d'observations de la température pélagique des lacs. L'Institut central suisse de météorologie, à Zurich, s'est adressé aux Compagnies des bateaux à vapeur suisses et leur a demandé leur collaboration qui a été accordée fort gracieusement. Il s'agissait de faire mesurer chaque jour, par les officiers des bateaux à vapeur en service, la température superficielle du lac au point où le navire en marche se trouvait vers l'heure de midi. Des instruments convenables ont été fournis par l'Institut à chaque bateau. Les instructions que j'ai rédigées à cette occasion portent :

1° « L'observation de la température du lac doit être faite chaque jour, entre 11^h et 1^h, quand le bateau naviguera en plein lac, ou à une distance suffisante de la rive (dans l'eau bleue).

2° » L'observateur fera remplir un seau avec de l'eau puisée directement dans le lac ; il le fera vider après avoir rincé le seau [1], puis il le fera remplir une seconde fois. Il plongera le thermomètre enfermé dans son enveloppe de bois, en l'agitant doucement dans l'eau. Au bout de 1 $^1/_2$ ou 2 minutes, quand la colonne de mercure aura cessé de varier, il notera la température en degrés et dixièmes de degré. Il l'inscrira dans le tableau en indiquant l'heure de l'observation, le point du lac où l'observation a été faite et l'état du lac.

3° » Il faut éviter de puiser l'eau du côté du bateau où l'eau de condensation de la machine est rejetée dans le lac.

4° » Quand le soleil brille, il faut mettre le seau à l'ombre pendant qu'on mesure la température.

[1] Pour obtenir l'équilibration thermique des parois du seau avec la température de l'eau.

5° » Dans la rubrique « état du lac » indiquer brièvement l'état du temps et celui du lac. Par exemple : « Grand beau.... couvert..... pluie..... brouillard..... bise..... sudois..... grosses vagues..... vagues mortes..... calme, etc. »

6° » Transmettre à la fin du mois le tableau à la Direction des bateaux à vapeur, qui l'expédiera à l'Institut fédéral de météorologie à Zurich. »

Si cette méthode avait été suivie avec persévérance pendant quelques années sur tous les lacs suisses, nous aurions obtenu bientôt une collection de matériaux utiles qui nous auraient permis de donner des valeurs approximatives de l'important facteur climatique de la température pélagique des lacs. Malheureusement, dans cette méthode, on est obligé de faire appel à trop de bonnes volontés, qui n'y sont pas toujours assez directement intéressées, et les observations n'ont pas été continuées pendant une durée suffisamment longue.

Toujours est-il que nous avons obtenu pour le Léman plusieurs milliers d'observations qui s'étendent sur 23 mois, de mai 1889 à juin 1891, et qui nous fournissent un précieux matériel pour la connaissance de la température pélagique du lac. Nous reviendrons plus loin sur d'autres questions qui peuvent être étudiées à l'aide de ces observations ; pour le moment, nous voulons nous en servir pour la détermination générale de la température pélagique du Léman.

Avant tout nous devons critiquer la méthode, et en préciser la valeur.

Les thermomètres étaient du type du thermomètre de bain, thermomètre à mercure, divisé en degrés centigrades, enveloppé d'une chemise en bois. Nous l'avons choisi suffisamment rustique pour résister aux fatigues d'une campagne prolongée. Pourquoi ne pas prendre des instruments plus délicats, divisés, par exemple, en cinquièmes ou en dixièmes de degrés ? La réponse à cette question est facile. Nous n'avons pas voulu attribuer à ces observations une exactitude qu'elles ne sauraient avoir. Ainsi que nous allons le dire, la température de la surface varie au même instant d'un point à l'autre, à quelques kilomètres, souvent à quelques hectomètres de distance, de valeurs importantes atteignant jusqu'à un ou deux degrés. Cela étant, pourquoi donner la température à un dixième de degré près, quand l'instrument, plongé à quelques centaines de mètres plus loin, nous indiquerait

des différences de 1 ou 2 degrés en plus? On peut se demander si l'agitation de l'eau causée par la marche du bateau ne mélange pas assez les couches pour que nous obtenions non pas la température superficielle, mais plutôt celle des couches sous-jacentes? Nous avons reconnu, par des études comparatives, que la couche supérieure, jusqu'à $^1/_2$ à 1^m, a sensiblement la même température, que la stratification thermique y est très faible, que l'erreur de ce fait est sans importance. Les erreurs d'observation, les erreurs d'instruments, les erreurs dues à l'équation personnelle de l'opérateur, sont bien plus fortes que le dixième de degré; il suffit, pour des observations de ce genre, de mesurer la température au degré près. Plusieurs de nos collaborateurs ont noté la température de l'eau en demis, en quarts, en dixièmes de degré; nous en avons tenu compte dans l'établissement des moyennes.

Grâce au nombre considérable des bateaux naviguant sur le Léman, alors même que tous les services ne les amenassent pas en plein lac à l'heure règlementaire de midi, nous avons le plus souvent un nombre suffisant d'observations, surtout pour les mois d'été, pour que nous puissions en tirer des moyennes valables.

Comment utiliser ces milliers de lectures [1], de valeur assez inégale, il faut l'avouer?

J'aurais pu choisir dans les séries d'observations celles qui me paraissaient les meilleures et les plus sûres, celles dont les variations correspondaient le mieux avec les faits météorologiques, celles qui dénotaient le plus de soin. Mais en agissant ainsi, je n'aurais eu la température du lac qu'en un point spécial, et j'aurais perdu le bénéfice de la multiplicité des observations. J'ai préféré supposer que les erreurs en plus ou en moins s'annuleraient les unes les autres; j'ai admis pour bonnes toutes les observations qui nous ont été remises, en n'écartant que celles qui présentaient des signes évidents d'inexactitude, et j'en ai pris pour chaque jour la moyenne arithmétique; puis j'ai cherché, comme pour les séries précédentes, les différences individuelles avec les observations journalières de Genève, et pour chaque mois j'ai tiré la moyenne de la variation. Voici les chiffres que j'ai obtenus.

[1] Cette série représente 2705 lectures individuelles.

	DATES	NOMBRE[1] DE BATEAUX	NOMBRE DE JOURS	DIFFÉRENCE
1889	Mai	1	14	0.0°
	Juin	2-5	22	+ 1.3
	Juillet	2-5	27	+ 2.1
	Août	4-6	24	+ 2.4
	Septembre	2-4	24	— 0.2
	Octobre	2	27	+ 0.2
1890	Janvier	1	25	+ 0.2
	Février	2	24	— 0.2
	Mars	1	14	+ 0.1
	Avril	1-2	26	— 0.9
	Mai	1-2	26	+ 0.9
	Juin	3-8	25	+ 0.9
	Juillet	5-8	27	+ 1.4
	Août	4-7	26	+ 0.9
	Septembre	4-8	25	— 0.8
	Octobre	3-6	27	— 0.1
	Novembre	3-5	25	— 0.5
	Décembre	2-4	26	+ 0.4
1891	Février	6	24	— 0.1
	Mars	5	25	— 0.7
	Avril	3-8	26	— 0.8
	Mai	4-5	25	+ 2.4
	Juin	4-6	26	+ 2.7

Les résultats de cette série sont assez parallèles à ceux des autres séries, les différences étant cependant un peu plus faibles, ce qui amène des différences négatives pour les mois d'automne.

Nous disposons ainsi, en réunissant ces trois séries, de 963 jours de comparaison entre la température pélagique et celle de Genève ; les observations du Grand-lac sont de valeur très inégale, et prises dans des conditions très irrégulières et très différentes ; je n'ose pas essayer d'en tirer directement les valeurs moyennes de la température pélagique. Mais en attendant que nous ayons mieux, je vais en extraire la valeur moyenne probable de la différence mensuelle avec les températures du port de Genève. Les observations de ma première série portant sur 8 années différentes ont plus de valeur pour moi en annulant mieux les variations accidentelles ; pour l'établissement de la moyenne, je leur donnerai plus d'importance et les multiplierai par le facteur trois.

J'obtiens ainsi une valeur provisoire de la correction à apporter

[1] Les observations manquent souvent, pour causes diverses, sur les tableaux fournis par les divers bateaux. Cette colonne indique les nombres extrêmes des observations qui ont servi pour les moyennes.

aux moyennes mensuelles de la température du port de Genève, et j'en déduis la température mensuelle de la région pélagique du lac.

Mois	Température du port de Genève. 1853-1875	Correction probable.	Température pélagique du Léman.
Janvier	5.1	+ 0.8°	5.9°
Février	5.0	+ 0.6	5.6
Mars	6.1	— 0.1	6.0
Avril	8.8	— 0.5	8.3
Mai	11.7	+ 0.9	12.6
Juin	15.3	+ 2.2	17.5
Juillet	18.1	+ 1.8	19.9
Août	18.6	+ 1.4	20.0
Septembre	17.1	— 0.1	17.0
Octobre	14.0	+ 0.1	15.1
Novembre	9.6	+ 0.4	10.0
Décembre	6.1	+ 1.1	7.2

Je le répète, cette température pélagique du Léman a été obtenue par voie indirecte ; elle sera corrigée lorsqu'on aura, par voie directe, des observations en nombre suffisant.

Nous reviendrons sur ces valeurs pour en tirer des comparaisons météorologiques intéressantes. Mais auparavant nous devons étudier quelques-uns des caractères généraux de cette température pélagique.

1° *Variation locale de la température pélagique.* Le premier fait qui résulte de l'ensemble des observations, c'est l'inégalité de la température d'un point à l'autre. Il est rare que la surface de l'eau soit partout au même degré de chaleur ; il est rare, on peut dire sans exemple, que des mesures thermométriques simultanées en des localités différentes donnent exactement la même température. Il y a toujours des dixièmes de degré, il y a souvent des degrés de différence. Je donnerai quelques exemples de cette variabilité de la température.

Le premier sera tiré des observations faites par les capitaines de bateaux à vapeur. Je prends un jour quelconque, choisi au milieu d'une série de beaux jours, par un lac calme : le 26 juillet 1890.

Bateaux	Capitaines	Heure	Traversée	Température
Aigle	Ruh	12h40m	Bouveret-Villeneuve	19.0°
Léman	Mégemont	11 40	Vevey-Clarens	19.6
Simplon	Decré	12 40	Ouchy-Evian	20.2
Mont-Blanc	Marthoud	11 45	Evian-Ouchy	20.0
Chillon	Meylan	12 35	St-Prex-Rolle	19.0
Cygne	Perret	10 40	Yvoire-Nyon	18.4
France	Gebel	11 40	Nernier-Nyon	17.5

Si dans ces observations, faites par diverses personnes, avec des instruments divers, il peut y avoir des différences provenant de l'équation personnelle du lecteur ou du thermomètre, il n'en est plus ainsi dans les observations que j'ai faites moi-même avec le même thermomètre. Exemples :

17 juin 1882	15h15min	Golfe des Pierrettes (1)	15.2°
— — —	15 30	— de Morges	13.3
28 juin 1882	9 00	— de Morges	16.6
— — —	9 20	— des Pierrettes	17.4
— — —	18 40	— des Pierrettes	19.0
— — —	19 05	— de Morges	18.0

Ou encore : Dans la traversée d'Ouchy à Morges, je mesurais la température chaque 2 ou 3 minutes de la marche du bateau à vapeur, le 27 mai 1880 :

12h20min	14.0°	12h30min	14.0°	12h40min	15.5°
— 23	13.3	— 32	13.7	— 43	15.0
— 26	14.0	— 35	15.7	— 46	15.2
— 28	15.0	— 37	15.8		

Ces exemples, que je pourrais multiplier beaucoup, ont été choisis dans des jours de grand beau, de grand calme ; ils montrent que d'un point à l'autre, indépendamment de toute cause perturbatrice actuelle, la température du lac peut varier de plusieurs dixièmes de degré, de 1, de 2 degrés et plus, à quelques centaines de mètres de distance. D'un golfe à l'autre, dans le même golfe de place en place, la température de la surface est notablement différente. Cette variabilité locale est la plus grande quand la stratification thermique est la plus accentuée ; je l'ai cependant constatée en toutes saisons.

Il suit de là que c'est un problème fort compliqué que d'évaluer avec exactitude la température pélagique d'un lac ; qu'il ne suffit pas de mesurer cette température à un point donné ; qu'il est nécessaire, pour arriver à la précision désirable, de la mesurer dans une infinité de points et d'en chercher l'intégration. On se heurte à des difficultés pratiques insurmontables. Ce n'est qu'en répétant pendant longtemps, année après année, les observations en un nombre consi-

(1) Entre Ouchy et St-Sulpice.

dérable de localités que l'on peut arriver à une approximation suffisante.

2° *Variations locales de la température sous l'influence du vent.* La différence entre la température des diverses régions du lac peut être grandement exagérée par l'action des vents. Les courants que nous avons étudiés p. 278, et que nous avons désignés sous le nom de courants de retour, en amenant à la surface, vers la côte sur le vent, les eaux des couches moyennes et profondes, occasionnent un abaissement local de température qui ne se fait pas sentir à l'autre bout du lac. Il est d'expérience banale dans le monde des baigneurs que l'eau est fortement refroidie à Genève par le vent sudois, sur la rive nord du lac, à Morges, à Ouchy, par la bise. Etant donnée la forme des côtes, la variation est beaucoup plus accentuée dans le premier cas ; à Genève, la chute du thermomètre dans l'eau peut atteindre 5°, 6°, 8° et plus. Le plus bel exemple que j'en aie est celui du 24 juillet 1879, dans lequel j'ai trouvé moi-même pour la température de la surface au large d'Ouchy entre 18.1° et 19.6°, tandis que la température du port de Genève, à midi, était descendue à 9.4°. La différence la plus forte a été de 10.2°; c'était à la suite d'un grand vent sudois qui avait sévi pendant 4 jours.

3° *Variation de la température de surface par l'effet des vagues.* Ce n'est pas seulement l'action du courant de retour qui en cas de grand vent modifie la température superficielle. Il y a aussi une action locale due probablement au mélange de la couche supérieure avec les couches sous-jacentes. De fortes vagues abaissent rapidement la température de la nappe d'eau. J'en donnerai un exemple frappant. Le 14 mai 1884, je faisais la traversée du lac d'Ouchy à Evian, et j'ai constaté les variations suivantes :

11h25m	Traversée d'Ouchy-Evian,	tiers lac	17.8°	Calme, ciel gris.
11 40	id.	moitié lac	16.3	id.
11 50	id	tiers lac	15.9	id.
13 —	Fort coup de vent sudois. Grosses vagues.			
14 15	Traversée d'Evian-Ouchy,	tiers lac	12.1°	Grd vent sudois.
14 30	id.	moitié lac	11.9	id.

Le lendemain j'allai vérifier la température du lac au large de Morges et je retrouvai encore 11.9°. L'abaissement de température avait été de 4° environ.

4° *Variations locales de la température par l'effet du trouble des eaux.* Lorsque les eaux de surface sont salies par l'alluvion impalpable apportée par un affluent débordé, ou soulevée par les vagues à la côte sous le vent, elles sont opaques, non seulement pour la lumière, comme nous le verrons plus loin, mais aussi pour la chaleur; elles sont relativement adiathermanes. Aussi, dans ces taches d'eau louche qui diaprent le lac après un orage ou une tempête, si le soleil apparaît, sa chaleur rayonnante est arrêtée à la surface du lac, la réchauffe extraordinairement, sans pénétrer dans les couches sous-jacentes, comme elle le fait dans les eaux limpides. J'ai vu souvent la température s'élever localement de 2 ou 3 degrés plus haut dans les taches opaques que dans les parties environnantes du lac où l'eau était restée propre.

Nous pourrions tirer de ce fait, s'il en était besoin, une preuve de la diathermanéité de l'eau.

5° *Variations régionales de la température.* Y a-t-il des différences systématiques au point de vue de la température superficielle entre les différentes régions du lac? A cette question je n'hésite pas à répondre : oui. De même que la température atmosphérique est plus chaude ou plus froide dans certaines stations plus abritées ou plus ventées, plus ensoleillées ou plus nuageuses, de même pour la température du lac. Ainsi par exemple, le golfe de Morges est généralement de 1 à 2 degrés plus froid que le golfe des Pierrettes, ce que j'attribue au courant d'air du morget, beaucoup plus intense sur le premier. Ainsi le Haut-lac est très fréquemment plus chaud que la partie occidentale du Grand-lac; le Grand-lac que le Petit-lac.

Voici un exemple entre plusieurs, mesuré par M. Provost, capitaine du bateau à vapeur le *Jura*.

21 février 1880. — Calme. Gris.

Traversée de	Rivaz-Cully	5.6°
—	Lutry-Ouchy	5.4
—	Morges-Rolle	4.8
—	Nyon-Coppet	4.2
—	Versoix-Genève	4.0

Le surlendemain, je répétai moi-même ces mesures et je constatai combien la variation était régulière.

23 février 1880. — Calme. Gris.

12h50min	Devant le Boiron de Morges	Grand-lac	5.0°
13 40	De Rolle à Promenthoux	—	4.8
14 00	Devant Prangins	Petit-lac	4.6
14 13	Devant le Boiron de Nyon	—	4.2
14 20	Devant Céligny	—	4.1
14 30	Près de Coppet	—	4.0
14 40 à 15h10	de Coppet à Genève (6 mesures)	—	3.9 à 3.8

D'autrefois c'est le Petit-lac qui est plus chaud que le Grand-lac. En voici un exemple tiré de mes notes personnelles :

21 mai 1879. — Grand beau. Calme.

9h40min	Golfe de Morges	Grand-lac	9.4°
9 45	— de Fraidaigues	—	9.5
9 55	— de St-Prex	—	9.7
10 45	Devant Prangins	Petit-lac	10.5
11 02	— Crans	—	11.1
11 24	— Myes	—	11.2
11 36	— Genthod	—	11.9

On le voit, ces variations régionales peuvent être fort accentuées et elles sont parfois systématiques. Elles mériteraient d'être étudiées attentivement. Elles diffèrent probablement suivant les saisons. Mais leur complication est si grande que je n'ai pas encore pu en démêler les lois. Je me borne à constater le fait sans oser essayer d'en indiquer l'ordonnance. Plus loin, quand j'étudierai la formation de la barre thermique littorale de l'hiver, j'aurai à montrer une variation systématique bien caractérisée qui rend le Petit-lac notablement plus froid que le Grand-lac en hiver.

6. *Variation périodique journalière.* Il est une question très importante qui domine toutes les recherches que l'on peut faire sur la variabilité de la température pélagique : Y a-t-il une variation journalière ? Quelle en est la valeur ? A quelle heure doit-on mesurer la température de l'eau pour obtenir la moyenne de la journée ? Quelles sont les limites de l'erreur commise quand on mesure la température à un moment quelconque de la journée.

Quand les physiciens de Morges ont, en 1851 et 1852, observé la température du lac, voici dans quels termes ils ont traité cette ques-

tion : « On a observé la température de l'eau au mois d'août 1851, le matin et le soir, aux moments présumés du maximum et du minimum ; la variation diurne a été trouvée de 0.7°. Dès lors on s'est contenté d'une seule observation vers le milieu du jour, ordinairement entre 1 et 2 heures de l'après-midi. » (1)

Il est évident que le lac suit les variations thermiques journalières de l'atmosphère ambiante ; il se réchauffe pendant le jour, se refroidit pendant la nuit ; il se réchauffe plus quand le soleil brille, il se refroidit plus quand la nuit est sereine ; le maximum de température de l'eau est à la fin de de la phase diurne, le minimum à la fin de la phase nocturne ; le maximum de cette variation doit avoir lieu au printemps et en été, lorsque le lac est en phase de stratification directe, au commencement de l'hiver, lorsque le lac arrive à la phase de stratification inverse.

Après m'être assuré de l'existence de cette variation par des observations personnelles, nécessairement irrégulières, j'ai cherché à obtenir une série méthodique et je me suis adressé à la collaboration obligeante des capitaines de bateaux à vapeur qui naviguaient régulièrement sur le lac. Dans l'été de 1886, MM. Devaud, du *Chillon*, et Milleret, du *Guillaume-Tell*, ont mesuré la température du lac dans la traversée d'Ouchy à Evian, le matin et le soir à 7^h et à 18^h. Voici le résultat moyen de leurs observations :

Juin	1886	27 jours	différence moyenne	0.5°
Juillet	—	26 —	—	1.5

Sur ces 53 jours d'observation, il y en a eu 9 pendant lesquels la température a été plus basse le soir que le matin, par le fait d'un refroidissement accidentel.

Dans les jours à différence positive il y a eu

17	jours à différence de	0.0°	à	0.9°
13	—	1.0		1.9
9	—	2.0		2.9
3	—	3.0		3.9
2	—	4.0		4.4

La différence maximale a été 4.4°.

Pendant ce temps, M. Tournier, capitaine du *Simplon*, mesurait la température à l'heure de midi, dans la même traversée d'Ouchy à

(1) *Ch. Dufour* [loc. cit. 307] p. 219.

Evian. Sauf deux exceptions, la température de midi a toujours été plus élevée que celle du matin, moins élevée que celle du soir.

L'amplitude de la variation journalière n'est donc pas très considérable ; dans ces deux mois d'observation (et nous pouvons admettre que ces mois expriment assez bien la variation la plus forte du lac) elle a été en moyenne de 1.1° ; elle reste en général inférieure à 2° ; elle atteint au maximum 4° et 4 $^1/_2$°.

Les heures les plus propices pour obtenir par une seule observation la température moyenne de la journée sont ou midi, ou minuit ; il est plus simple de la faire au milieu de la journée, entre 11 et 13 h.

7° *Variation périodique annuelle.* Quant à la variation annuelle de la température pélagique, son amplitude doit, d'après les valeurs de la page 315, être évaluée par les chiffres moyens (provisoires) suivants :

température moyenne de février	5.6°
— — d'août	20.0
amplitude moyenne de la variation annuelle	14.4°

Les extrêmes de la température pélagique, d'après l'ensemble de nos observations des vingt dernières années sont

minimum	hiver de 1891	4.0°
maximum	(passim.)	24.0
amplitude des variations extrêmes		20.0°

Quant aux allures de cette variation annuelle, je les exprimerai en faisant la différence entre les moyennes de deux mois successifs, et en divisant cette différence par le nombre de jours du mois ; j'obtiendrai ainsi le taux de la variation en 24 heures (évaluée en centièmes de degré).

	Différence entre les moyennes mensuelles	Taux de la variation en 24 heures.
Décembre à janvier	— 1.3°	— 4 centièmes de degré
Janvier à février	— 0.3	— 1
Février à mars	+ 0.4	+ 1
Mars à avril	+ 2.3	+ 7
Avril à mai	+ 4.3	+ 14
Mai à juin	+ 4.9	+ 16
Juin à juillet	+ 2.4	+ 8
Juillet à août	+ 0.1	+ 0
Août à septembre	— 3.0	— 10
Septembre à octobre	— 1.9	— 6
Octobre à novembre	— 4.9	— 16
Novembre à décembre	— 3.0	— 10

La variation a des allures régulières, sauf pour les mois d'août à novembre ; il y a là l'indice d'une insuffisance dans les corrections sur lesquelles j'ai basé mes valeurs de la température pélagique. La courbe deviendrait régulière si l'on relevait la température moyenne de septembre et l'on abaissait celle d'octobre.

On voit, d'après les faits résumés dans les pages précédentes, combien l'étude de la température pélagique d'un lac est chose compliquée, et quelles incertitudes il reste dans les chiffres que nous avons donnés pour la valeur probable de la température pélagique du Léman [1]. Cette incertitude ne dépasse du reste certainement pas un degré dans les valeurs mensuelles.

B. *Action climatique de la température lacustre.*

Quoi qu'il en soit, après avoir fait toutes les réserves nécessaires sur la signification provisoire des chiffres donnés pour la température pélagique du Léman, comme ils sont pour le moment ce que nous avons de mieux dans cet ordre de recherches, nous devons les utiliser pour apprécier l'influence de la nappe du Léman sur le climat de la contrée avoisinante.

TEMPÉRATURE PÉLAGIQUE DU LÉMAN ET TEMPÉRATURE ATMOSPHÉRIQUE DE LA VALLÉE

Nous comparerons en premier lieu la température pélagique du lac avec la température de l'atmosphère telle que nous l'avons établie en prenant la moyenne des cinq stations : Genève, Morges, Lausanne, Montreux, Aigle [2]. Nous avons ainsi le tableau suivant :

[1] Si l'on me demandait le programme d'une étude systématique de la température pélagique du Léman, je le proposerais dans ces termes : Faire mesurer chaque jour, à bord d'un bateau à vapeur faisant vers l'heure de midi la traversée d'Ouchy à Evian, la température superficielle de l'eau au moyen d'un instrument traîné derrière le bateau (en évitant le côté où se fait la vidange des eaux de la machine). Cet instrument serait : ou bien un thermomètre à maximum et minimum (Miller-Casella) ; la moyenne entre les extrêmes donnerait la température moyenne pélagique, — ou bien un thermomètre enregistreur dont la courbe serait intégrée. Cette étude devrait être répétée chaque jour pendant un nombre suffisant d'années.

[2] T. I, p. 277.

	Température de l'air	Température du lac	Différence
Décembre	0.8°	7.2°	+ 6.4
Janvier	0.8	5.9	+ 5.1
Février	2.1	5.6	+ 3.5
Mars	4.7	6.0	+ 1.3
Avril	9.5	8.3	— 1.2
Mai	13.2	12.6	— 0.6
Juin	16.8	17.5	+ 0.7
Juillet	18.9	19.9	+ 1.0
Août	18.1	20.0	+ 1.9
Septembre	15.0	17.0	+ 2.0
Octobre	10.3	15.1	+ 4.8
Novembre	4.6	10.2	+ 5.6
Hiver	1.2	6.2	+ 5.0
Printemps	9.1	9.0	— 0.2
Eté	17.9	19.1	+ 1.2
Automne	10.0	14.1	+ 4.1
Année	9.6	12.1	+ 2.5

La différence moyenne est 2.5° en faveur du lac ; le lac est plus chaud que l'air dans tous les mois sauf avril et mai, dans toutes les saisons sauf le printemps ; la différence atteint 5 et 6° dans le commencement de l'hiver.

Le lac est donc une nappe, de température relativement élevée, qui doit avoir pour notre vallée une action plutôt réchauffante. Sauf dans les mois du printemps, il doit tendre à relever la température de l'air. Quand nous aurons étudié la température des couches profondes du lac, nous pourrons donner la raison de cette action favorable.

Mais si, considérées dans leurs moyennes générales, les relations de température entre l'air et l'eau sont ce que nous venons de dire, le phénomène est beaucoup plus compliqué si l'on s'adresse aux faits réels tels qu'ils se passent dans la nature.

Nous avons, en effet, à faire intervenir en premier lieu la variation périodique journalière.

L'amplitude de la variation journalière est très grande dans la température aérienne, elle est très faible dans la température lacustre. Pour la température atmosphérique, nous avons vu (T. I, p. 274) qu'elle est en moyenne à Genève :

hiver	variation journalière	moyenne	3.6°
printemps	—	—	7.0
été	—	—	8.9
automne	—	—	5.9
année	—	—	6.4

Nous pouvons admettre que ces chiffres sont applicables à l'ensemble de la vallée. Or nous venons de voir que, dans les conditions les plus favorables, l'amplitude de la variation journalière de la température pélagique du lac n'est que de 1.1°, qu'elle est certainement inférieure à 2° et ne dépasse pas 4°. Le lac représente donc une étendue considérable à température relativement constante ; pendant le milieu de la journée, il a une tendance à être moins chaud que l'air sus-jacent ; pendant la nuit, il est plus chaud. Il doit donc être un modérateur des variations thermiques de l'air, et il est en effet un modérateur puissant.

Cherchons si possible à rendre compte de l'effet de la variation journalière. Supposons que la variation journalière soit nulle dans l'eau du lac ; admettons que l'atmosphère qui surmonte la région pélagique subisse les mêmes variations journalières que E. Plantamour a constatées à Genève [1]. Nous pourrons indiquer pendant combien d'heures de la journée moyenne de chaque mois l'air est plus chaud que la surface du lac, pendant combien d'heures il est plus froid.

Exemple de ce calcul : La température moyenne de l'eau pélagique du lac dans le mois de juillet est 19.9° ; la température moyenne de l'air est 18.8°. Mais par le fait de la variation journalière, l'air s'élève au-dessus de 19.9° depuis 10^h à 19^h, soit pendant 10 heures ; il reste en dessous de la température du lac pendant 14 heures. Je répète ce calcul pour les autres mois.

D'après les moyennes générales, la température de l'air est plus élevée que celle du lac

en mars	de	11^h	à	18^h	soit pendant 8 heures
avril		10		23	14
mai		9		22	14
juin		9		20	12
juillet		10		19	10
août		11		18	8
septembre		11		17	7

dans les mois d'octobre à février le lac reste toute la journée plus chaud que l'air.

Ainsi donc, en nous adressant aux moyennes générales des tempé-

[1] Climat de Genève, II, 12.

ratures aériennes et lacustres, nous voyons que, pendant les sept mois de la saison chaude, malgré les différences considérables entre la moyenne atmosphérique et la moyenne lacustre, l'air est plus chaud que le lac pendant quelques heures de la phase diurne.

Mais si ces relations présentent déjà une telle complication dans les moyennes générales, il est évident que le phénomène est en réalité beaucoup plus compliqué encore ; les températures moyennes que nous avons utilisées représentent un état général intermédiaire entre les cas extrêmes, accidentels, qui d'un jour à l'autre varient dans des proportions considérables ; les chiffres donnés par les moyennes ne s'observent que très rarement, pour ainsi dire jamais. Tantôt c'est l'air qui est plus chaud, tantôt c'est l'eau qui dépasse la température normale ; l'air se réchauffant, se refroidissant plus vite que l'eau. Les cas accidentels qui sortent des conditions moyennes sont très fréquents et ne doivent pas surprendre celui qui demande à la loi l'explication des faits qu'il observe.

TEMPÉRATURE PÉLAGIQUE ET HUMIDITÉ ATMOSPHÉRIQUE

Une nappe d'eau évapore tant que sa température est plus élevée que celle du point de saturation de l'air ; quand elle est plus basse, l'eau condense à sa surface la vapeur d'eau contenue dans l'air.

Nous avons vu, t. I, p. 281, quel est l'état moyen de la tension de la vapeur d'eau dans l'atmosphère de Genève. Admettant que cet état soit celui de l'air qui surmonte l'ensemble du lac, je cherche les conditions hydrométriques de la nappe du Léman par le calcul suivant :

Au mois de janvier, la tension de la vapeur d'eau dans l'air est (à Genève) de 4.15^{mm} de mercure. Cette tension correspond à celle de la saturation de l'air à -1.4^{o}. Dans le mois de janvier, la température pélagique de l'eau est $+5.9^{o}$. Il y a donc un excès de 7.3^{o} de la température pélagique du lac sur la température de saturation de l'air ; l'eau du lac est donc dans les conditions de l'évaporation et doit émettre des vapeurs dans l'atmosphère. Il est inutile de donner les valeurs analogues pour chaque mois ; je me borne aux valeurs saisonnières et annuelles :

	Tension de la vapeur d'eau de l'air	Température de saturation de l'air	Température pélagique du lac	Différence
Hiver	4.2mm	— 1.2°	6.2°	7.4°
Printemps	6.2	+ 4.2	9.0	4.8
Eté	10.4	+11.9	19.1	7.2
Automne	7.5	+ 7.0	14.1	7.1
Année	7.1	+ 6.2	12.1	5.9

La différence est considérable ; elle est toujours positive ; la température de saturation de l'air est toujours plus basse que la température pélagique du lac ; il y a donc toujours, dans les moyennes, les conditions de l'évaporation de la surface du lac. (1)

Mais n'allons pas trop loin. Nous ne parlons que des moyennes générales ; dans les cas individuels, il peut y avoir des conditions autres. Souvent le lac descend à une température beaucoup plus basse que celle qui est indiquée par la moyenne mensuelle. Souvent la tension de la vapeur d'eau est très supérieure à celle que donnent les moyennes de Genève. Ne considérons que ce dernier cas : Si nous prenons sur les tableaux d'E. Plantamour (2) les valeurs extrêmes données pour la tension de la vapeur d'eau, nous reconnaissons qu'il y a, pour chaque mois, des exemples où la condition de la condensation doit être représentée. Ainsi, par exemple, le maximum de tension de vapeur d'eau observée à Genève pour le mois de janvier a été, dans les années 1861 à 1875, de 8.48mm de mercure, ce qui correspond à une température de saturation de + 8.8°. La moyenne de la température pélagique de janvier étant de + 5.9°, il est évident que ce jour-là, pendant quelques heures du moins, il y a eu les conditions de la condensation. J'indiquerai ces extrêmes pour six mois également répartis dans l'année ; on verra que le même fait s'y reconnaît partout.

(1) Ce n'est pas toujours et partout le cas. Si nous faisions le même calcul des conditions générales de l'évaporation pour le Rhône du Valais, en supposant l'atmosphère moyenne de Genève transportée sur le Rhône, dont nous avons vu la température en l'année 1886 (t. I, p. 364). nous trouverions que le fleuve aurait dégagé de la vapeur d'eau dans l'air pendant les mois de septembre à mai, mais qu'il y aurait eu condensation à la surface du fleuve pendant les mois de juin à août. De là, en partie, la sécheresse extrême de l'air de la grande vallée du Valais.

(2) *E. Plantamour*. Climat de Genève, II, 162, sq.

	Valeur extrême de la tension de la vapeur	Température de saturation de l'air	Température pélagique moyenne.
Janvier	8.5mm	8.8°	5.9°
Mars	9.2	10.0	6.0
Mai	14.5	17.1	12.6
Juillet	20.1	22.4	19.9
Septembre	15.9	18.6	17.0
Novembre	10.1	11.5	10.2

Ainsi donc, il y a possibilité et probabilité de cas exceptionnels dans lesquels la vapeur d'eau atmosphérique se condense à la surface du lac. Mais ces cas sont rares. Le fait normal est l'évaporation de la vapeur d'eau du lac dans l'air.

C. Température littorale.

Tandis que les variations locales de la température pélagique sont peu considérables et sont fort irrégulières, nous observons presque constamment une différence assez importante dans la température de la surface, entre le plein lac et le rivage. La température du littoral varie plus que la température pélagique ; en été l'eau s'y réchauffe plus pendant la journée ; en hiver elle y est plus froide.

C'est ce qui résulte de l'ensemble de mes observations. Pour un exemple de l'excès de chaleur littorale, je donnerai le suivant, entre cent analogues :

3 mai 1879. — Forte bise.

10h55min	Bains d'Ouchy	littoral	9.0°
11 05	Quai du débarcadère d'Ouchy	—	8.1
11 10	Tête — —	—	7.4
11 27 à 11 52	Golfe des Pierrettes	pélagique	7.1 à 7.3°
11 57	Golfe de Morges	—	6.6
12 15	Quai de Morges	littoral	8.7

Pour l'excès de froid, en hiver, dans la température littorale, je me bornerai à dire ici que l'on voit parfois se former de la glace au fond des golfes, que par conséquent l'eau y descend à 0°, tandis que le plein lac reste toujours au-dessus de 4°. Je traiterai dans un paragraphe spécial ces cas de congélation littorale.

Je regrette de n'avoir pas fait méthodiquement l'étude de la tempé-

rature littorale comparée à celle de la température pélagique. Il y a des différences systématiques diverses selon les saisons. Malheureusement mes observations à ce sujet sont trop incomplètes ; pendant longtemps j'ai mesuré avec soin la température littorale à Morges, pendant longtemps aussi j'ai étudié la température pélagique; mais les deux séries ne coïncident pas, et je n'ai su retrouver dans mes notes que quelques observations valables à ce point de vue. Elles se rapportent à l'année 1879; en voici les résultats : le signe + indique que la température littorale est plus élevée que la pélagique.

	MOIS	NOMBRE D'OBSERVATIONS	DIFFÉRENCE MOYENNE
1879	Février	4	— 1.1°
	Mars	13	+ 1.0
	Avril	7	+ 1.2
	Mai	11	+ 1.4
	Juin	10	— 0.1
	Août	1	— 0.3
	Septembre	1	+ 0.1
	Octobre	2	+ 0.1
	Novembre	5	— 1.1

C'est là un matériel d'observation absolument insuffisant. Aussi me bornerai-je à la formule générale suivante qui doit être vraie : Pendant la période de réchauffement du lac, la température littorale est plus élevée ; pendant la période de refroidissement, elle est plus froide que la température pélagique. (1)

(1) Je puis appuyer cette énonciation sur une comparaison très complète que nous avons faite entre la température du port de Lindau et celle de la région pélagique du Bodan.

Voici les chiffres moyens de ces différences résultant des observations d'août 1889 à février 1891 ; le signe + indique que le port était plus chaud que le plein lac.

Janvier	— 2.2°	Juillet	+ 0.2°
Février	— 1.5	Août	+ 0.1
Mars	+ 0.9	Septembre	— 0.1
Avril	+ 2.6	Octobre	— 0.1
Mai	+ 1.6	Novembre	— 0.6
Juin	+ 0.9	Décembre	— 2.9

Dans les mois de mars à août, la température du port était plus élevée que celle du plein lac, dans les mois de septembre à février moins élevée. *F.-A. Forel.* Die Temperatur-Verhältnisse des Bodensees p. 11. Schriften des Bodensees Vereins XXII Heft. 1893.

Nous pouvons considérer comme appartenant à la température littorale, celle qui depuis 1853 est mesurée tous les jours (excepté les dimanches) dans le port de Genève, sous le pont du Mont-Blanc, par les soins de l'Observatoire de cette ville. L'eau dans laquelle on plonge le thermomètre est de l'eau des régions littorales des deux côtes du lac mélangée avec l'eau de la région médiane ou pélagique du Petit-lac; mais celle-ci a passé sur le Banc du Travers et a traversé le port; elle y a subi les influences modificatrices du littoral. Ces eaux de provenances diverses sont mélangées par le puissant courant du goulet principal du port, et arrivent à une température uniforme; c'est ce que prouvent les importantes observations de M. A. Kammermann, astronome de l'Observatoire de Genève, en janvier 1891. Il a fait plusieurs séries de mesures thermométriques, depuis la surface jusqu'à 2 mètres de profondeur, soit dans la rade de Genève, soit dans le port. En voici les résultats : (1)

30 janvier 1891. — Ciel couvert. Calme.

Profondeur	A 100 mètres en dehors des jetées			Au milieu du goulet principal	Au milieu du port	Pont des Bergues	Debarcadère du Jard. anglais
	rive droite	milieu	rive gauche				
0m	1.95°	1.85°	2.45°	2.50°	2.50°	2.55°	2.55°
0.5	2.15	2.20	2.40	2.45	2.40	2.50	2.45
1.0	2.25	2.30	2.45	2.45	2.35	2.55	2.50
1.5	2.45	2.30	2.50	2.50	2.45	2.55	2.55
2.0	2.50	2.35	2.5	2.45	2.45	—	—

C'était par un temps froid; la température moyenne de la journée avait été de — 3.6°, le minimum des 24 heures — 9.2°. Depuis longtemps, depuis la fin de décembre, le Petit-lac était à une température inférieure à 4° et en état de stratification inverse. La stratification est très bien accusée dans les sondages thermométriques pris par M. Kammermann en dehors du port, tout au moins dans les deux premiers pris sur la rive droite et au milieu de la rade. Mais dès qu'il arriva dans le goulet entre les deux jetées, puis au milieu du port, au pont des

(1) A. *Kammermann.* In litt. 31 janvier 1891.

Bergues et au Jardin anglais, toute trace de stratification disparut ; les différences de un dixième ou de un vingtième de degré qui séparent les diverses lectures sont insignifiantes. — Ajoutons qu'à cette époque le niveau du lac était fort bas (ZL + 1.26^{m}), que toutes les vannes du barrage de Genève étaient fermées, que le courant était relativement faible, et que, en toutes autres circonstances, le mélange des eaux aurait été encore plus parfait.

Dans ses Premières études sur le Climat de Genève, p. 56, E. Plantamour dit que la mesure de la température du port de Genève se fait à 1^{m} de profondeur sous la surface ; il répète cette affirmation dans ses Nouvelles études (1). Actuellement, c'est à 2^{m} de profondeur que se fait cette mesure. A l'Observatoire de Genève, on ignore si l'affirmation de Plantamour repose sur une erreur, ou bien s'il y a eu changement dans les conditions de l'observation ; s'il y a eu changement, il a eu lieu avant 1882, et il n'en est pas resté trace dans les archives de l'observatoire (2). Les expériences de M. Kammermann, que nous venons de citer, montrent que cette différence dans le lieu de la thermométrie n'a aucune importance, et aucun inconvénient.

Quoi qu'il en soit, les mesures thermométriques de Genève ne s'adressent pas aux eaux de surface ; elles donnent la température d'un mélange d'eaux de la surface et des couches sous-jacentes, des eaux pélagiques du Petit-lac, et des eaux littorales de la rade de Genève. Quand il y a stratification thermique directe, la température de la surface est plus chaude ; quand il y a stratification inverse, la température de la surface est plus froide que les chiffres indiqués par les observations de Genève. Nous aurons à revenir sur ces différences.

Les observations sur la température du Rhône, commencées en 1853 sous la direction de E. Plantamour, se continuent encore de nos jours ; elles forment la plus belle série connue de recherches sur la thermométrie d'un lac. Les premières 23 années ont été dépouillées et discutées par E. Plantamour en 1875 (3) ; j'extrairai de son étude quelques faits intéressants. Et d'abord, voici les moyennes mensuelles de la température avec les différences d'un mois à l'autre.

(1) Climat de Genève, II, p. 97.

(2) *A. Kammermann.* In litt. 26 janvier 1891.

(3) Climat de Genève, II, 97. 1876.

	TEMPÉRATURE MOYENNE	DIFFÉRENCE D'UN MOIS A L'AUTRE
Janvier	5.1°	
Février	5.0	— 0.1°
Mars	6.1	+ 0.9
Avril	8.8	+ 1.3
Mai	11.7	+ 2.9
Juin	15.3	+ 3.6
Juillet	18.0	+ 2.7
Août	18.6	+ 0.6
Septembre	17.1	— 1.5
Octobre	14.0	— 2.9
Novembre	9.6	— 4.4
Décembre	6.6	— 3.0
		— 1.5
Année	11.3	

J'ai donné, page 315, les différences entre ces températures de Genève et la température pélagique du Grand-lac ; la température du Rhône de Genève est plus froide pendant 10 mois de l'année ; ce n'est qu'en mars et avril qu'elle est plus chaude que celle du lac. Le degré relativement bas de la température du port de Genève provient en grande partie du mélange des eaux que nous venons de décrire.

Plantamour a tiré des observations une formule périodique exprimant la variation annuelle ; grâce à elle nous avons, avec une grande précision, l'époque moyenne des extrêmes, à savoir :

minimum	par	4.8°	le 30 janvier
maximum	par	18.8°	le 11 août

La phase de réchauffement, dans la première moitié de l'année, dure 192 jours ; elle est de 19 jours plus allongée que celle de refroidissement qui n'est que de 173 jours. Je n'ai aucune objection à étendre à l'ensemble du lac ces dates tirées des observations locales de Genève.

Les extrêmes de température directement observés à Genève ont été :

maximum	24.6°	15 juillet	1874
minimum	0.2°	20 février	1891 (1)

Amplitude extrême des variations 24.4°.

Nous reviendrons sur ces températures du port de Genève quand nous étudierons la congélation du lac.

(1) Comme nous le dirons plus loin, le lac s'est plusieurs fois congelé dans la rade de Genève ; on peut donc admettre que la température locale y est descendue à 0.0°.

Nous pouvons y prendre une idée de la variabilité de la température du lac. En utilisant les chiffres de Plantamour, je dresserai un tableau qui permettra de juger de cette variabilité ; j'y donnerai la différence moyenne mensuelle entre les extrêmes de température observés chaque jour des 23 années d'observation ; puis les plus divergents des extrêmes de température observés directement ; enfin la différence entre ces extrêmes de divergence maximale, qui exprime l'amplitude de la variation.

	Différence moyenne entre les extrêmes d'un même mois	Maximum observé	Minimum observé	Amplitude de variation
Janvier	2.0°	7.7°	1.8°	5.9°
Février	2.1	7.5	0.9	6.6
Mars	2.9	10.8	3.3	7.5
Avril	5.0	14.4	4.8	9.6
Mai	7.1	17.8	5.8	12.0
Juin	9.3	21.6	7.0	14.6
Juillet	10.6	24.6	7.5	17.1
Août	8.7	24.1	8.1	16.0
Septembre	7.0	21.9	7.0	14.9
Octobre	7.3	18.9	6.6	12.3
Novembre	4.5	14.0	6.0	8.0
Décembre	3.3	9.6	1.7	7.9

On ne peut être que frappé de l'amplitude considérable de la variation. Elle est moins grande que celle de l'air atmosphérique qui s'élève, à Genève, de 20° en novembre à 24° en mai (1). Mais étant connues la faible variabilité de la température de l'eau, la lenteur de son réchauffement, la lenteur de son refroidissement, on doit demander l'explication de variations aussi considérables que celles qui ont amené la température du Rhône, au mois de juillet, de 7.5° le 1er juillet 1865, à 24.6° le 15 juillet 1874. La cause en est la suivante. La plus grande divergence de la température est due à des écarts négatifs (2). Tandis que les écarts positifs relativement faibles, causés par un échauffement local excessif se rapportent à des jours de grand calme, de grand soleil, pendant

(1) Climat de Genève, II, 84.

(2) Du 13 au 14 juillet 1892, le port de Genève a passé de 19.8° à 10.5° : différence 9.3°.

lesquels la stratification thermique directe est fortement accentuée, les écarts négatifs ont lieu lorsqu'un grand vent du sud balaie la couche de surface et, la chassant loin de Genève, la fait remplacer par les eaux profondes plus froides. Ces écarts négatifs peuvent être très considérables et d'un jour à l'autre la température du lac baisse de 6°, de 8° et plus [1]. C'est donc essentiellement à des phénomènes de convection mécanique, et non à des faits de conduction qu'est due cette variabilité considérable de la température du lac à Genève.

D. Réflexion de la chaleur solaire par le miroir du lac.

Nous possédons une excellente étude faite sur ce sujet, au bord du Léman, en 1873, par notre très regretté collègue et ami feu le professeur Louis Dufour de Lausanne. [2]

Que la chaleur, de même que la lumière, soit partiellement réfléchie par le miroir des eaux, lorsque le lac est calme, cela est évident à première vue ; que cette réflexion ait de même lieu sur le miroir fragmenté des vagues lorsque le lac est agité, c'est facile aussi à comprendre. Mais Dufour a voulu aller plus loin, et il a cherché à préciser les conditions et les proportions de cette réflexion. Les résultats qu'il a obtenus sont intéressants.

La méthode employée était fort simple. Trois thermomètres étaient placés au centre de sphères creuses en cuivre, recouvertes d'un vernis noir mat (boules de Gasparin), dans une localité convenable, à Ouchy, au Désaley, à Rivaz, à Chexbres ou à Lausanne, où on pouvait les exposer à la fois aux rayons directs du soleil et aux rayons réfléchis par le lac ; les trois boules étaient mises simultanément en observation et soustraites alternativement, par des écrans, contre l'une ou l'autre des sources de chaleur rayonnante. Je renvoie au mémoire original pour la discussion très délicate des expériences, et je me borne aux résultats qui se résument en ces termes :

1° La plus forte quantité de chaleur réfléchie par la surface du lac a

[1] Nous ne parlons ici que des cas de la stratification directe dans les mois d'été. Dans l'hiver, en cas de stratification inverse, la variabilité est beaucoup moins grande.

[2] *L. Dufour.* Recherches sur la réflexion de la chaleur solaire à la surface du lac Léman. Bull. S. V. S. N. XII, 1. Lausanne 1873.

été 0.68, soit plus de la moitié de la chaleur reçue directement du soleil.

2° La proportion de chaleur réfléchie augmente à mesure que le soleil s'abaisse sur l'horizon.

3° La proportion de chaleur réfléchie est plus forte par un lac calme que par un lac agité.

4° La proportion de chaleur réfléchie, constatée par les instruments, est d'autant plus forte que la station est plus rapprochée du lac ; la chaleur réfléchie est puissamment absorbée par l'air atmosphérique saturé de vapeur d'eau.

5° Cette absorption par l'atmosphère de la chaleur réfléchie se constate aussi à mesure que le soleil s'abaisse sur l'horizon, le point de réflexion s'éloignant de la station des thermomètres. Il en résulte qu'il y a un moment de maximum dans la quantité de chaleur réfléchie et que ce moment n'est pas quand le soleil est à l'horizon, mais quand il est encore à quelques degrés au-dessus de l'horizon. Le maximum observé l'a été par des hauteurs de soleil de 3°34' et 4°38'.

« Sans être bien considérable » dit L. Dufour, « la chaleur solaire réfléchie par le lac est cependant assez importante pour exercer une influence sensible sur le climat des régions qui peuvent en profiter. Grâce au lac, la chaleur qui atteint une partie de la région située à l'est, au nord et à l'ouest du bassin du Léman, se trouve un peu augmentée. C'est comme si, durant une certaine fraction de l'année, laquelle varie avec la situation des stations, le temps pendant lequel le soleil se trouve sur l'horizon était un peu prolongé. Cet accroissement de chaleur doit avoir quelque influence sur la végétation et spécialement sur les vignobles qui recouvrent les pentes plus ou moins fortement inclinées de la côte nord du lac. »

Post-Scriptum. — J'ai dit, page 318, que les variations locales de la température du lac sont parfois causées par le trouble des eaux : les eaux salies par de l'alluvion en suspension arrêtent la chaleur dans les couches superficielles et l'empêchent de se propager librement dans les couches sous-jacentes. Je viens de terminer quelques expériences qui le prouvent directement.

Je remplis deux bouteilles en verre transparent, l'une d'eau limpide passée au filtre Chamberland, l'autre d'eau salie par quelques déci-

grammes d'argile délayée. Je les expose côte à côte au soleil et je mesure la température de l'eau. En voici un exemple :

Du 5 juillet 1894. Soleil brillant, température de l'air de 20° à 25°.

heure	eau claire	eau louche
7h20min	19.0°	19.0°
8.15	23.9	25.9
9.30	27.5	29.4
11.00	30.1	31.4
12.00	32.0	34.2
13.05	32.6	35.6

L'eau rendue opaque par l'alluvion en suspension a eu, dans cette expérience, constamment une température de 2° plus élevée que l'eau limpide.

II. **La température profonde.**

A. *Méthodes d'observation.*

La température des couches profondes de l'eau demande pour sa mensuration des méthodes ou des appareils spéciaux. En effet, la pression, qui augmente de la valeur d'une atmosphère avec chaque 10m d'épaisseur d'eau, comprime les thermomètres ordinaires et les déforme, ou passagèrement ou définitivement ; les indications des thermométrographes non protégés contre la pression sont toutes erronées. Et même si l'on veut, comme le faisait H.-B. de Saussure [1], descendre dans l'eau un thermomètre très peu sensible, suffisamment isolé pour que sa température ne se modifie pas dans le retour au bateau, la lecture que l'on fait après un tel voyage est peu sûre ; les déformations qu'a subies l'instrument ne se corrigeant pas immédiatement au moment du retour à la pression normale.

Deux appareils inventés dans les vingt dernières années ont résolu parfaitement le problème de mesurer la température de la couche même où s'arrête l'instrument, sans altération possible dans la traversée des couches supérieures plus chaudes ou moins chaudes. Ce

[1] Voyages dans les Alpes, I, p. 23. Neuchâtel 1799.

sont les thermomètres Six-Casella et Negretti et Zambra, l'un et l'autre à Londres.

Le Miller-Casella est un thermomètre de Six, à maximum et à minimum, dont la boule est logée dans un tube extérieur de verre qui la protège contre les effets de la pression. C'est un bon instrument, pratique dans certaines circonstances; mais pour l'étude des lacs, je lui préfère le Negretti et Zambra, qui lui est très supérieur.

Je me suis servi uniquement du thermomètre à renversement de Negretti et Zambra (Deep sea inverting thermometer) et l'instrument que j'ai possédé depuis le printemps de 1879 jusqu'au 29 septembre 1890 (1) m'a parfaitement satisfait.

C'est un thermomètre à mercure, logé dans un double tube de verre, le tube extérieur étant seul influençable par les variations de la pression extérieure; c'est un thermomètre à renversement dont la colonne se brise, à un point déterminé par un rétrécissement du tube, à l'instant où l'appareil est renversé boule en haut; la longueur de la colonne mercurielle séparée de la masse principale est mesurée sur une échelle gravée sur le verre et donne la température au moment du renversement.

Les constructeurs ont donné deux modèles de l'appareil de renversement. Le modèle métallique est un cadre qui peut basculer, sous l'action libératrice d'une roue à ailettes, ou hélice, qui se met en jeu lorsque l'on commence à remonter la sonde; le déclanchement se fait après un ou deux mètres de trajet (2). Le modèle en bois est une caissette allongée, en bois de sapin, alourdie jusqu'à la densité de l'eau par du plomb; celui-ci est sous forme de grenaille, et mobile dans la caisse, de telle sorte que son déplacement assure la stabilité verticale de l'appareil dans la position qu'on lui fait prendre. La caissette est attachée à la ligne de sonde par une cordelette flottante qui lui permet de prendre la position boule en bas pendant la descente, boule en haut pendant la remontée. C'est de ce dernier modèle que je me suis servi de préférence; il est plus rustique et d'un emploi plus pratique dans les nacelles à équilibre peu stable où nous travaillons sur nos lacs.

(1) Le thermomètre gît actuellement au fond de l'entonnoir du Boubioz, au lac d'Annecy.

(2) Un autre modèle fait partir le déclanchement sous l'impulsion d'un messager qui glisse le long de la ligne de sonde.

La caissette de bois du Negretti et Zambra présente cependant un inconvénient qui l'a fait rejeter par plusieurs naturalistes. Tant que l'appareil ne descend pas plus bas que 50 ou 100^{m}, la caisse flotte très bien entre deux eaux et suit docilement les positions qu'on lui fait prendre ; mais sitôt qu'on l'emploie à de plus grandes profondeurs, la pression chasse l'eau dans les pores du bois par les éraillures inévitables du vernis, et la densité de l'appareil devient supérieure à celle de l'eau. Le thermomètre descend bien boule en bas tant que le plomb de la sonde l'entraîne rapidement vers le fond ; mais la caissette s'incline aussitôt qu'elle s'arrête dans la couche d'observation, et elle se renverse avant que l'équilibre thermique se soit établi.

Une manœuvre très simple me permet d'obvier à ce défaut. Je laisse descendre la sonde avec son thermomètre à la profondeur voulue ; je les laisse reposer dans l'eau les 3 minutes de temps nécessaire à l'équilibration thermique. Puis, avant de pratiquer le dévidage en retour pour remonter la sonde, je commence par la laisser descendre rapidement de 2^{m} environ, puis rapidement aussi je renverse le mouvement et je relève la ligne jusqu'à la surface. Pendant les deux mètres de descente, le thermomètre qui, dans sa caissette, s'était renversé boule en haut, se retourne boule en bas; la colonne de mercure se soude à nouveau pour se briser au point voulu par la température, à l'instant où la remontée commence. La manœuvre est assez rapide pour que la température du mercure n'ait pas eu le temps de se modifier ; du reste, dans les profondeurs dont il s'agit, il n'y a pas de variations de chaleur appréciables dans une couche de 2^{m} d'épaisseur.

Avec l'introduction de cette petite manœuvre accessoire, j'estime que le thermomètre Negretti et Zambra est le plus pratique et le plus parfait des bathythermomètres.

Un voyageur qui ne posséderait pas un thermomètre protégé contre la pression, arriverait à mesurer la température profonde d'un lac avec un thermomètre ordinaire, par les procédés suivants :

Ou bien il placera une bouteille à col étroit au milieu d'un récipient rempli de sable mouillé. Il attachera le tout à une corde et le descendra à la profondeur voulue où il le laissera reposer sur le sol pendant 8 ou 10 heures au moins. Quand il remontera l'appareil, il plongera son thermomètre dans l'eau de la bouteille qui aura conservé, dans son retour rapide, la température même des couches profondes.

Ou bien il draguera avec un bidon de métal une quantité suffisante,

un litre au moins de limon, et il en mesurera la température à l'arrivée à la surface. Dans un limon argileux-marneux comme celui du lac Léman, cette méthode m'a donné la température des eaux profondes avec une approximation supérieure à $^1/_{10}$ de degré.

Voici en effet une des expériences qui m'ont prouvé la lenteur extrême de la pénétration de la chaleur jusqu'au centre d'une masse de vase du lac :

Le 14 mars 1870. Je place un thermomètre au milieu d'un bidon de fer-blanc (drague métallique) rempli par un dragage en plein lac de la vase des grands fonds, sans aucune manœuvre extérieure qui ait modifié la consistance du limon. Je plonge le bidon dans un baquet d'eau à la température moyenne de 28° (extrêmes 27° à 29°) et je constate la vitesse du réchauffement par les lectures suivantes : la température du limon était à l'origine de 5.8°.

Heures	Température du limon.	Heures	Température du limon.
11h42′00″	5.8°	11h49′50″	6.2°
46.30	5.9	50.35	6.3
48.00	6.0	51.15	6.4
49.00	6.1	51.50	6.5

Pour relever la température du limon de 0.1°, il a fallu 4 $^1/_2$ minutes, durée égale à celle qui ramène une sonde de la profondeur de 225m. Voici en effet, d'après ma pratique, le temps que nécessite un dragage :

Sondage à	75m	Durée de la remontée	50″
»	90	»	1′.25″
»	200	»	4′.—
»	300	»	6′.—

La méthode est parfaitement suffisante pour la détermination de la température d'un lac qui n'est pas trop profond.

B. Histoire de la bathythermométrie du Léman.

1° C'est dans le Léman que les premières études connues sur la température profonde des eaux lacustres ont été faites ; nous les devons à l'illustre naturaliste genevois H.-B. de Saussure. (1)

(1) Voyages dans les Alpes, I, sq. p. 18 Neuchâtel 1799.

En août 1767, il a commencé ses recherches en mesurant la température du lac devant sa campagne de Genthod, par 27^{m} de fond ; son thermomètre s'arrêta à 12.7°. (1)

Le 6 août 1774, Mallet et Pictet de Genève trouvèrent près de Chillon, par 100^{m} de profondeur, une température de 10.8°.

En février 1779, Saussure constata devant Meillerie 5.4°, par 308^{m} de fond (lisez C^{a} 260^{m}) (2) et devant Evian 5.2°, par 201^{m} (lisez 310^{m}).

Les détails donnés par l'auteur aux §§ 32 et 42 de ses Voyages, sur la sensibilité des thermomètres qu'il envoyait au fond du lac entourés d'appareils protecteurs, sont peu rassurants et laisseraient une marge assez large aux inexactitudes. Le thermomètre variait de 2 à 4° et plus en parcourant, dans une eau de température légèrement différente, un trajet de six ou sept cents pieds. Les précautions décrites aux §§ 1392 et 1393 donnent au contraire la conviction que Saussure était arrivé à écarter au moins les principales causes d'erreur. Dix minutes d'agitation dans l'eau ne faisait plus varier son thermomètre que de $^{1}/_{10}$ de degré.

Du reste, quelle que fût la sensibilité de ses instruments, le fait que sa dernière série d'observations était faite en février, époque à laquelle l'uniformisation thermique est complète, et le fait que la température de la surface de l'eau mesurée avec soin pendant les observations était à peu près la même que celle du fond (5.6°), nous permettent d'accepter comme bonnes, les observations de Saussure, et d'admettre qu'en 1779 le fond du lac était à 5.2°.

C'est en se fondant sur ces expériences que Saussure a formulé la théorie de la thermique des lacs profonds qui est restée classique. Je ne résiste pas au plaisir de citer les propres termes du physicien genevois, qui sera toujours un modèle de précision et de concision (3) : « La différence de densité entre l'eau froide et l'eau chaude suffirait pour donner en hiver à peu près la même température à une masse d'eau quelque profonde qu'elle pût être. Car les premiers froids qui agissent sur la surface de l'eau condensent les parties de cette surface, tandis que les parties intérieures conservent encore la chaleur qu'elles

(1) Je traduis en degrés centigrades les mesures faites par les auteurs en degrés de l'échelle de Réaumur ou de Fahrenheit.

(2) Voyez l'explication que j'ai donnée de cette erreur de Saussure, t. I, p. 30.

(3) [Loc. cit., p. 338] § 49.

ont acquise pendant l'été ; celles de la surface, devenues plus pesantes, doivent donc s'enfoncer, tandis que celles du fond s'élèvent à raison de leur légèreté. Celles-ci, parvenues à la surface, se refroidissent à leur tour, redescendent, sont remplacées par d'autres, et ainsi, de proche en proche, il doit s'établir dans toute la masse une température à peu près uniforme. Quand, au contraire, la chaleur de l'air extérieur surpasse celle de l'eau, et qu'ainsi la surface devient plus chaude que le fond, la différence de densité favorise la différence de température entre les eaux du fond et celles de la surface ; celles-ci, dilatées par la chaleur, tendent à conserver la place la plus élevée, et celles du fond, plus denses et plus pesantes, tendent aussi à demeurer en bas. »

2° Une importante série de sondages thermométriques a été faite dans le Léman du 15 septembre au 1er octobre 1819 par le géologue anglais H.-Th. de la Bèche (1). Dans son voyage d'études sur le lac, il a en même temps dressé la carte des sondages et mesuré la température de l'eau au contact du fond. Les sondages thermométriques ont été au nombre de 89.

Voici en tableau, pour chaque couche, les températures extrêmes qu'il a observées, et les moyennes que j'en ai tirées :

PROFONDEUR	MAXIMUM	MINIMUM	MOYENNE
De 1 à 5m	19.5°	19.0°	19.3°
5 à 10	18.4	17.7	18.2
10 à 20	17.7	16.6	17.0
20 à 30	14.5	12.7	13.8
30 à 40	14.6	9.9	11.6
40 à 50	10.5	7.2	8.3
50 à 60	10.0	7.2	7.8
60 à 75	8.4	6.6	7.1
75 à 128	6.7	6.4	6.6
145 à 300	6.4	6.4	6.4

La Bèche employait un thermométrographe, construit par Newman de Londres, qu'il faisait descendre dans le lac ; l'index indiquait la température de la couche la plus froide traversée ; comme le Léman est à cette époque toujours en stratification directe, il obtenait bien ainsi la température de la couche la plus profonde où il arrêtait son

(1) Bibliothèque universelle de Genève. Sc. et arts, XII, 118. 1819.

sondage. Mais l'appareil n'était pas protégé contre la pression extérieure ; il était comprimé et déformé par cette pression, et par conséquent les températures indiquées par l'instrument étaient entachées d'une erreur positive ; la température réelle était plus basse que les chiffres donnés par la Bèche.

3° Je dois citer ici, pour être complet, une série de sondages thermométriques faits en juillet 1835, devant Chillon, par les physiciens français Becquerel et Breschet, à l'aide d'un appareil thermo-électrique de leur invention. (1)

Les auteurs disent dans leur mémoire que l'on n'obtient les fractions de degré que jusqu'à la profondeur de vingt mètres. Voici les valeurs qu'ils ont observées :

0m	19.8°
20	12.3
40	9.0
60	7.6
80	6.5
104	6.5

Ces chiffres sont parfaitement plausibles.

4° L'un des physiciens de Morges, le colonel F. Burnier, a construit (2) un appareil assez compliqué, par lequel il descendait un thermomètre dans la couche dont il voulait mesurer la température ; il l'y laissait six heures et le ramenait à la surface entouré par plusieurs enveloppes protectrices d'eau qui gardaient la température profonde. Cet appareil avait l'inconvénient de n'être pas protégé contre la pression et de subir par conséquent une déformation temporaire. M. Ch. Dufour n'a pas retrouvé, dans les notes de Burnier qu'il possède, les résultats des recherches faites avec cet instrument.

5° J'ai commencé moi-même à étudier la température profonde du lac en 1870, en plongeant un thermomètre au milieu du limon que ramenait ma drague (3). Ainsi que je l'ai dit plus haut, page 338, l'exactitude de la mesure était de près de 0.1°.

(1) *Becquerel et Breschel.* Procédé électro-chimique pour déterminer la température de la terre et des lacs à diverses profondeurs. Comptes-rendus, Acad. Sc Paris, 26 déc. 1836. — Bibl. univ. Sc. et Arts, VII, 173. Genève 1837.

(2) Bull. S. V. S. N., III, 244. Lausanne 1853.

(3) *F.-A. Forel.* Matériaux pour l'étude de la faune profonde du Léman. 1re série § IX. Bull. S. V. S. N. XIII, 38. Lausanne, 1874.

Voici d'abord trois expériences isolées faites par cette méthode :

19 février 1870	30m	5.4°
26 — —	90	5.2
27 mars 1871	65	5.4

Voici en outre deux séries assez serrées d'expériences donnant les allures de la température en été et en hiver.

La première série énumère les températures obtenues en juin et juillet 1873; je les ordonne en fonction de la profondeur.

Profondeur	Dates	Température
4m	31 juillet	19.1°
11	28 —	20.2
12	29 —	17.9
20	28 —	12.0
26	28 —	10 1
30	21 juin	8.0
32	29 juillet	7.8
40	10 —	7.0
59	28 —	6.5
79	14 juin	6.4
84	28 juillet	6.3
132	28 —	5.9
216	30 —	5.9
258	30 —	5.9

Cette série montre très bien la décroissance de la température à mesure que l'on s'adresse à des couches de plus en plus profondes.

La seconde série étudiait des températures prises dans des profondeurs peu considérables, de 20 à 70m, de décembre 1873 à février 1874 :

Dates	Profondeur	Température
22 décembre 1873	50m	7.1°
13 janvier 1874	19	6.2
13 — —	22	6.2
13 — —	29	6.2
19 — —	68	6.0
20 — —	69	6.0
22 — —	26	6.2
28 — —	18	6.3
28 janvier 1874	23	6.2

Dates			Profondeur	Température
28	—	—	28	6.1
30	—	—	28	6.1
30	—	—	38	6.1
8	février	—	27	5.9
8	—	—	40	5.9
12	—	—	23	5.7
14	—	—	46	5.7
25	—	—	50	5.5

Ces chiffres montrent très bien le refroidissement progressif de la surface, mais aussi le fait que ce refroidissement s'opère presque simultanément sur toute l'épaisseur de cette couche à température uniformisée.

C. *Recherches modernes sur la température profonde du Léman.*

Tels étaient les faits connus de la température du fond du lac Léman, lorsqu'en automne 1878, Negretti et Zambra publièrent l'invention de leur Deep-sea inverting thermometer[1]. Je me procurai immédiatement deux de ces instruments; l'un d'eux était parfait, il m'a servi pour toutes mes recherches ultérieures; le second était..... moins bon. Je commençai alors des observations méthodiques pour apprendre à connaître les allures de la thermique des eaux profondes du lac. Pendant deux ans, 1879 et 1880, j'allai régulièrement faire, à intervalles rapprochés, une série de sondages thermométriques, espacés de 10 en 10 mètres dans les couches supérieures, moins nombreux dans les couches profondes où la variation est plus lente. Quand j'eus ainsi les bases suffisantes pour la compréhension du phénomène, je pus me contenter de sondages moins fréquents.

En 1885 et 1886, pendant qu'il levait la carte hydrographique du Léman dans les eaux suisses, M. l'ingénieur Hörnlimann, du bureau topographique fédéral, a fait plusieurs séries complètes de sondages thermométriques dans plusieurs régions du lac. Il employait un thermomètre Negretti et Zambra, avec appareil de renversement à hélice.

A partir de 1891, l'obligeante collaboration de M. l'ingénieur A. Delebecque, à Thonon, m'a fourni des matériaux précieux, dont je le remercie. Il se sert comme moi d'un Negretti et Zambra à caissette de bois.

[1] Nature. XVIII, 348. London 1878.

Je donne dans le tableau de la page 336, le matériel complet des observations faites dans le Grand-lac de 1879 à 1894. Les séries que je dois à MM. Hörnlimann et Delebecque sont désignées par les initiales H. et D. C'est en nous appuyant sur les faits que ces nombreuses recherches nous ont appris, que successivement nous avons établi la théorie de la thermique des régions profondes du Léman; cette considération justifiera la publication de cette longue accumulation de chiffres.

Je traduis graphiquement les valeurs numériques d'une partie de mon tableau de bathythermométrie dans la planche VIII, page 353; j'y établis la marche approximative des isothermes pendant les années 1879 à 1881. Pour que le dessin ne fût pas trop compliqué, j'ai dû atténuer les irrégularités d'observation et assez souvent interpoler de mon mieux quand les mesures directes manquaient. (1)

Tel qu'il est, il représente assez suffisamment les allures de la thermique du lac pendant ces trois années pour qu'il puisse nous aider à la compréhension des faits naturels.

Le dépouillement des observations et l'étude de la planche VIII, nous montrent tout d'abord :

a. Que le Léman, dans la masse principale de son Grand-lac, ne descend pas au-dessous de 4°. Ses eaux sont toujours chaudes; il présente toujours la stratification directe; il appartient donc à notre type des lacs tropicaux.

b. Il s'est cependant tellement rapproché en 1891 de la température critique de 4°, qu'il a failli prendre la stratification inverse; il y est même arrivé dans certaines de ses parties, comme nous le verrons plus loin. Le Léman est donc à l'extrême limite des lacs tropicaux et même, sans changement notable du climat, il pourrait, dans certaines circonstances favorables (succession de plusieurs hivers rigoureux) arriver à la classe des lacs tempérés.

c. La planche VIII est assez semblable dans ses allures générales à notre figure schématique 105, p. 300, pour justifier entièrement celle-ci. La seule différence importante, c'est que les années considérées

(1) Dans cette planche, les isothermes d'un degré sont figurées par des lignes pleines, celles d'un demi ou d'un cinquième de degré par des lignes ponctuées. L'échelle des profondeurs est de 1mm pour 4 mètres, celle des temps de 1mm pour 4 jours.

LAC LÉMAN. — Sondages thermométriques. — F.-A. Forel; J. Hörnlimann; A. Delebecque. — 1879-1894.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Année	1879							1880									1881		1883
Date	14 mai	21 juin	24 juillet	20 août	24 sept	23 octobre	19 decem	26 fevrier	25 mars	5 avril	15 mai	25 mai	29 juillet	10 août	8 sept.	30 novem.	21 juillet	5 novem	26 fevr.
Lieu	Ouchy.	Ouchy.	Ouchy.	Ouchy.	Ouchy.	Ouchy.	Ouchy.	Ouchy.	Morges.	Ouchy.	Ouchy	Morges.	Ouchy.	Vevey	Ouchy.	Ouchy	Morges.	Ouchy.	Ouchy.
0m	10.3	19.6	18.9	22.5	19.5	11.4	5.5	4.9	6.1	8.2	—	14.2	21.7	18.3	21.1	9.1	21.3	9.9	6.9
10	7.2	12.5	14.8	18.3	16.6	11.2	5.5	4.9	5.7	6.4	—	8.7	18.4	17.6	17.5	—	19.8	—	—
20	7.0	8.9	14.0	12.9	12.4	11.4	—	4.8	5.4	6.1	—	7.6	12.0	8.5	12.7	—	9.4	—	—
30	6.9	7.5	11.8	10.7	9.5	10.5	—	4.7	5.3	4.9	—	7.5	8.4	7.3	9.0	—	7.7	—	—
40	6.8	6.7	8.0	7.9	7.7	8.3	—	4.7	5.1	4.7	—	—	7.1	6.5	7.8	9.1	—	7.9	6.2
50	6.5	6.4	6.8	7.0	7.1	7.0	5.5	4.7	4.9	—	—	—	6.6	6.1		7.6	—	—	—
60	6.4	6.2	6.4	6.3	6.4	6.5	—	4.7	4.8	—	—	—	6.2	5.9	6.4	7.6	—	—	—
70	5.9	5.9	6.1	6.1	6.1	6.1		4.7		—	—		5.8	—	—	—	—	—	—
80	5.7	5.6	5.9	5.9	5.8	5.9	—	4.6		4.7		—	5.4	5.3	5.5	5.9	—	6.1	6.1
90	5.5	5.4	5.7	5.7	5.6	5.7	—	4.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	5.4	5.4	5.6	5.6	5.5	5.6	5.5	4.6	—	4.6	—	—	5.0	4.9	5.0	5.4	—	—	—
110	5.3	5.3	5.5	5.5	5.4	5.5	—	—	—	4.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
120		5.3	5.4	5.4	5.4		—	4.5		—	—	—	4.7	4.7	4.9	5.2	—	5.5	
130		5.3	5.3	5.4	5.4	5.4	—	4.5	—	4.6	4.7	—	—	—	—	—	—	—	—
140			—		5.3	5.3			—	—	—	—	4.7	—	—	—	—	—	—
150	5.2	—				5.3	—		—	4.6	—			—	4.7	—	—	—	—
160						5.2	5.4	4.5	—	4.5	—	—		—		4.7	—	5.0	5.7
170	—			—		5.2		—	—	4.5	—	—	—	4.6	—	—	—	—	—
180			—	—		5.1	—	—		—	—	—	4.6	—	4.6	—	—	—	—
190		—		—			—	4.5	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—
200		—	—		5.3		—	—		—	—	—	4.5	—	—	4.7	—	4.9	—
210	5.2		—		—		5.2	—	—		4.5	—	—	—	—	—	—	—	—
220	—	—				—		4.5	—	4.4	—	—	4.5	—	4.5	—	—	—	—
230		—					5.2				—	—	—	—	—	—	—	—	—
240				—			5.1	—	—								—	4.7	5.0
250		—		—	—	—		—		—			—	—	—	4.6	—	—	—
260		5.3			—		—				—	—	4.5	—	—	—	—	—	—
270						—	5.1		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
280	—			—	—	5.1	—	4.4	—	—	—	—	4.5	—	—	—	—	4.7	—
290		—		—	—	—	—		—	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	—	—	—	5.3	—		—		—	—	4.4	—	—	—	—	4.5	—	—	4.9
310			5.3	—	—	—		4.4	—	4.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—

	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Année	1884			1885														
Date	15 mars	16 août	23 sept.	9 juillet	12 juillet	12 juillet	13 juillet	30 juillet	30 juillet	6 août	18 août	18 août	18 août	18 août	18 sept.	22 sept.	23 sept.	23 sept.
Lieu	Ouchy.	Evian.	Evian.	Chillon.	Evian.	Yvoire.	Morges.	Chillon. »	Clarens. »	Vevey »	Creux-de-Plan.	Tour-de-Peilz.	Bouches du Rhône côté Villeneuve.	Bouches du Rhône côté Bouveret.	Yvoire.	Bouveret. »	Saint-Gingolph. »	Saint-Saphorin. »
0m	8.9	21.0	17.7	21.1	22.4	22.0	20.0	20.4	21.1	20.0	21.0	20.9	20.8	20.8	18.0	18.3	18.0	19.1
10	—	16.6	17.7	14.4	17.8	17.9	16.1	19.0	17.7	17.7	18.1	17.8	19.5	—	15.5	16.8	16.5	16.8
20	6.3	11.1	15.2	11.2	13.2	12.6	11.8	14.7	15.9	12.7	13.6	14.0	15.0	16.8	14.0	13.8	13.9	14.5
30	6.1	9.6	11.8	10.4	9.7	8.8	10.2	12.0	11.0	10.3	10.8	12.1	11.9	10.1	9.8	9.4	10.3	9.5
40	6.0	7.8	8.6	8.9	8.2	7.4	9.0	9.3	8.0	7.5	7.5	8.6	8.8	8.2	7.3	8.0	7.8	7.6
50	—	6.5	7.2	8.5	7.4	6.6	6.8	7.1	6.7	6.8	6.7	7.1	6.8	—	6.1	7.0	7.2	6.7
60	5.9	—	6.5	8.0	6.8	—	6.5	6.6	6.5	6.4	6.4	6.5	—	—	5.9	6.5	6.6	6.4
70	—	—	—	7.3	6.6	—	—	6.2	6.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	5.8	—	6.0	—	—	—	—	6.1	6.2	6.1	6.1	6.1	—	—	—	6.1	6.2	6.1
90	—	—	—	—	6.3	—	—	6.0	6.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	—	5.7	—	6.8		—	—	—	—	6.0	5.9	6.0	—	—	—	6.0	6.0	5.9
110	—	—	—	—	—	—	—	—	5.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
120	5.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.8	—	—	—	—	5.9	—	—
130		—	—	—	—	—	—	—	5.8	5.8	—	—	—	—	—	—	5.9	5.8
140	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
160	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	5.8	—	—	—	—	—	—	5.8	5.6
170	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
180	—	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	5.7	—	—	—	—	—	—	—
190	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.7	—	—	—	—	—	—	5.6	5.6
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
210	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.6	—	—	—	—	—	—	—	—
220	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.6
230	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
240	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.6
250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
260	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
270	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
280	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
290	—	5.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
310	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
Année	1886				1887	1889	1891							1892		1894
Date	16 mars	10 mai	25 mai	25 juin	7 mars	19 sept.	24 janvier	21 fevrier	23 fevrier	23 fevrier	6 mars	4 avril	22 juin	16 janvier	28 mars	8 fevrier
Lieu	Ouchy.	Evian.	Ouchy »	Ouchy.	Morges.	Ouchy.	Evian. »	Ouchy	Bouveret.	Vevey.	Evian »	Evian »	Evian. »	Evian. »	Evian. »	Evian. »
0m	6.1	8.9	13.5	17.5	—	14.9	4.4	4.4	4.1	4.2	5.0	4.9	18.0	5.1	7.4	5.8
10	5.5	8.4	10.4	14.8	—	12.6	—	4.2	—	4.1	4.4	4.4	13.2	—	—	—
20	5.3	8.0	9.1	12.6	—	12.0	—	4.1	4.0	—	—	4.3	7.7	—	5.6	—
30	—	7.7	8.1	9.2	—	9.8	—	4.1	—	—	4.3	4.2	—	—	—	—
40	—	7.7	7.2	8.0	—	8.1	—	4.1	—	4.0	—	—	—	—	—	
50	—	6.8	6.9	—	—	6.7	4.4	4.1	—	—	4.2	—	5.0		—	—
60	—	—	6.6	6.4	—	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
70	—	5.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	5.7	6.1	6.1	—	5.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
90	—	—	—	—	5.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	5.3	5.7	5.6	5.5		4.9	4.4	4.1	—	—	4.1	—	4.3	4.8	—	5.4
110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.6	—
120	—	—	5.5	5.5	5.1	4.8	—	—	—		4.05	—	—	4.5	—	—
130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
140	—	5.5	5.4	5.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
150	—	—	—	—	—	4.7	—	4.1	—	—	4.0	—	—	4.2	—	—
160	—	—	5.3	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
170	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
180	—	5.3	—	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
190	—	—	—	—	—	—	—	4.1	—		—	—	—	—	—	—
200	—	—	5.2	5.2	—	—	4.3	—	—		—	—	—	4.2	4.5	4.8
210	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
220	—	—	—	5.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
230	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
240	—	—	—	5.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
250	—	—	5.1	—	—	—	4.2	—	—	—	3.98	4.0	—	4.2	—	—
260	—	—	—	5.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
270	—	—	—	—	—	—	4.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
280	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
290	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.97	—	—	—	—
300	—	—	5.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
310	5.2	—	—	5.0	—	4.7	4.0	—	—	—	3.95	3.95	4.1	4.15	4.4	4.65

n'ayant pas abaissé la température des eaux à 4°, l'isotherme de la température critique n'y est pas représentée.

d. La méthode des sondages thermométriques en série verticale est suffisante pour donner les allures générales de la thermique d'un lac. Pour une étude systématique, je conseillerai de répéter régulièrement ces sondages aux quatre saisons principales, à savoir : en février, en mai, en août, et en novembre, et de les faire aux profondeurs suivantes :

0m, 5, 10, 15, 20, (25), 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210, 250, 300, 400, 500 mètres, etc.

L'observateur apprendra bientôt comment il peut simplifier son travail en supprimant quelques mesures qui font double emploi. Les mesures à supprimer varieront d'un lac à l'autre et d'une saison à l'autre.

e. Le matériel d'observation que nous possédons sur le Léman nous permet de constater l'existence de trois ordres de variations périodiques dans la thermique du lac, à savoir :

La variation de périodicité journalière.
La variation annuelle.
La variation cyclique.

Nous traiterons d'abord des deux dernières.

I. VARIATION ANNUELLE

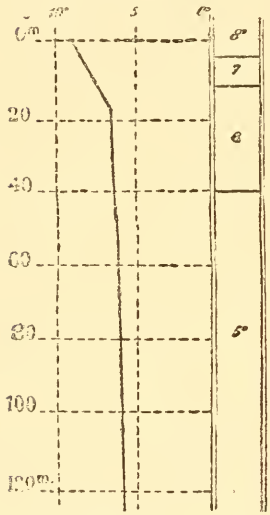
L'étude de notre planche VIII nous montre que pendant les saisons de réchauffement, au printemps et en été, le lac se stratifie thermiquement, que la stratification se développe et se perfectionne ; les isothermes descendent de plus en plus bas ; le lac est en phase de stratification. Pendant les saisons de refroidissement, en automne et en hiver, les eaux s'uniformisent, les isothermes remontent des profondeurs, la stratification thermique est détruite; le lac est en phase d'uniformisation.

Jusqu'à quelle profondeur cette action se fait-elle sentir? Nous le trouverons en cherchant la profondeur limite à laquelle les isothermes subissent les allures alternativement descendantes et remontantes de la périodicité annuelle; nous voyons, sur la planche VIII, qu'en 1879,

l'isotherme 5.5° est ainsi affectée jusqu'à la profondeur de 110m; qu'en 1880, l'isotherme 6° à la profondeur 80m. J'estime que la variation thermique annuelle se fait sentir normalement, dans le Léman, jusqu'à 100 ou peut-être 120m.

Quelles sont les allures de la stratification thermique aux diverses saisons de l'année ? — Si nous consultons notre tableau de la page 336, nous voyons que chaque série de sondages a son caractère spécial, individuel, qui ne se répète pas d'année en année. Résultante des faits météorologiques antérieurs, chaque série représente un état du lac particulier (1). Il serait difficile d'employer ici utilement la méthode des moyennes. Je préfère choisir dans nos séries quatre chaînes de sondages thermométriques que je donnerai comme types de l'état thermique du lac aux quatre saisons de l'année.

Pour le *printemps*, je prendrai comme exemple le sondage n° *20*, du 15 mars 1884, fig. 107. Après l'hiver qui avait uniformisé la température dans toute l'épaisseur du lac fortement refroidi, les premières chaleurs du printemps ont réchauffé les couches supérieures et commencé le procès de stratification. Tandis que les couches moyennes sont encore au-dessous de 6°, la surface s'est relevée à 9°, et jusqu'à 40m l'eau est au-dessus de 6°.

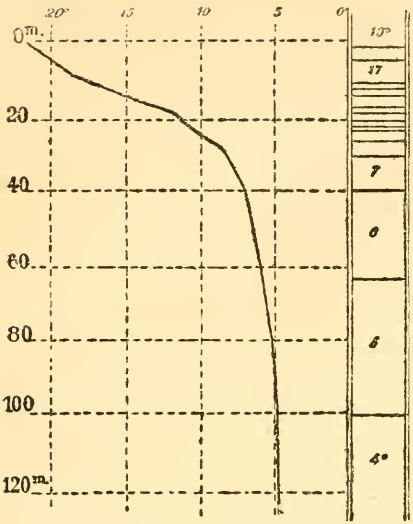


(Fig. 107.) Etat thermique du printemps. 15 mars 1884.

Je donne les schémas de ces états thermiques sous deux formes : dans une courbe, dont les abscisses sont les températures observées, les ordonnées, les profondeurs; dans une échelle, où j'ai placé les différentes isothermes à leurs profondeurs respectives.

L'état thermique de *l'été* sera figuré par le sondage n° *13*, du

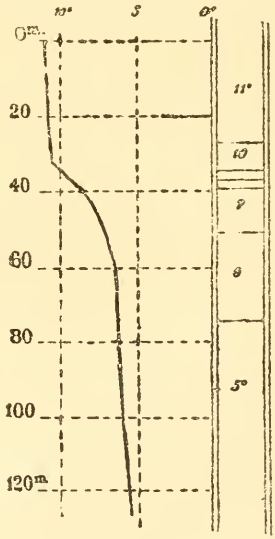
(1) Cela montre combien sont imprudents les physiciens qui, en possession d'un seul sondage thermométrique prétendent caractériser la thermique d'un lac. L'étude thermique d'un lac, plus que tout autre étude limnologique, demande une longue série d'observations comparables; elle est œuvre de patience, et non de généralisation hâtive.



(Fig. 108.) Etat thermique de l'été. 20 juillet 1880.

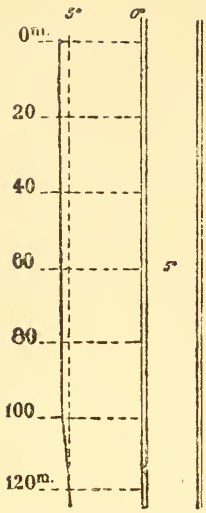
29 juillet 1880, fig. 108. La stratification thermique est brillamment représentée, depuis la surface où la température s'est élevée à 22° jusqu'aux profondeurs de 100m, où elle est encore à 5°. L'échelle qui est à côté de la courbe montre bien combien les isothermes sont de plus en plus espacés à mesure que l'on descend dans la profondeur.

La stratification d'*automne* est bien indiquée dans le sondage n° *6*, du 23 octobre 1879, fig. 109. La surface s'est refroidie depuis l'été ; la température s'est uniformisée dans les couches supérieures, jusque vers 30m de profondeur, qui sont à 11°. La stratification de l'été persiste dans les couches profondes. C'est la courbe de l'été coupée brusquement dans sa partie la plus élevée ; c'est l'échelle de l'été qui a perdu tous ses échelons supérieurs. J'aurais pu aussi prendre pour exemple le sondage n° *16*, du 30 novembre 1880, dans lequel la couche uniformisée dépasse 40m d'épaisseur, la température de la surface à 9.1° se continuant jusqu'à la couche de 40m et au-delà.



(Fig. 109.) Etat thermique de l'automne. 23 octobre 1879.

Quant à l'état thermique de l'*hiver*, il peut être recherché dans les sondages n° 7, du 19 décembre 1879, ou nos *44* et *45*, janvier et février 1891, dans lesquels la température est la même depuis la surface jusqu'au fond du lac. Cet état est si simple qu'il mérite à peine d'être représenté graphiquement



(Fig. 110.) Etat thermique de l'hiver. 19 décembre 1879.

(fig. 110). Nous avons une ligne verticale, parallèle à l'axe des ordonnées, et notre échelle est sans échelons.

Essayons, d'après les chiffres à notre disposition, d'établir quelle est la courbe normale de la stratification thermique lorsqu'elle est à son maximum de développement. Si je cherche dans le tableau de nos observations les températures maximales observées aux diverses profondeurs, j'ai les chiffres de la première colonne du tableau suivant; je régularise par une construction graphique les irrégularités de ces chiffres et j'obtiens les valeurs de la seconde colonne. Enfin, dans une troisième colonne, je donne le taux de la propagation de la chaleur, en indiquant la variation en millièmes (μ) de degré, pour l'épaisseur d'un mètre.

Profondeur	Température maximale observée	Température régularisée	Taux de la variation pour un mètre.
0m	24.0°	24.0°	
			600μ
10	18.4	18.0	
			300
20	15.2	15.0	
			350
30	11.8	11.5	
			250
40	9.1	9.0	
			150
50	7.6	7.5	
			80
60	7.6	6.7	
			30
80	6.1	6.0	
			5
100	5.9	5.9	
			5
120	5.8	5.8	
			3
150	5.7	5.7	

Le taux de la variation, très fort dans les couches supérieures, finit par devenir insensible dans les couches profondes, à partir de 80m.

Nous reviendrons bientôt sur la stratification des couches supérieures jusqu'à 20m au-dessous de la surface.

Nous constatons donc que la chaleur de l'été pénètre dans le lac, puissamment dans les couches supérieures, plus faiblement dans les couches moyennes; la stratification est très nettement accusée. Le taux de la variation allant en décroissant d'intensité de haut en bas, il

est évident que l'apport de la chaleur arrive par les couches supérieures, que c'est essentiellement la chaleur solaire qui entre dans le lac et s'y emmagasine.

Mais, si dans ses allures générales le taux de variation décroît de haut en bas, il est bien rare que cette variation soit régulière; si l'on consulte les tableaux numériques, on voit qu'il y a souvent de grandes irrégularités. Si j'établis par exemple le taux de variation pour les diverses couches superposées des six premiers sondages de mon tableau, en l'exprimant toujours par millième de millimètre pour une couche d'un mètre, je vois aux chiffres marqués par des astérisques des retour en arrière dans la progression décroissante de la variation; tantôt c'est dans une couche, tantôt c'est dans l'autre; il y a là quelque chose d'essentiellement irrégulier.

	1879					
	14 mai	21 juin	24 juillet	20 août	24 septemb.	23 octobre
	N° 1	2	3	4	5	6
0m	290 μ	710 μ	410 μ	420 μ	290 μ	20 μ
10	20	360	80	*540	*420	10
20	10	140	*220	220	290	*60
30	10	80	*380	*280	180	*220
40	*30	30	120	90	60	70
50	*40	20	40	70	*70	50
60	20	*30	25	20	30	30
80	15	10	15	15	15	15
100	5	5	10	10	5	10
120	3	0	3	—	3	3
150						

Une partie de ces irrégularités peuvent provenir d'erreurs d'observation; sans parler des erreurs de lecture, dans nos thermomètres à renversement, la rupture de la colonne de mercure ne se fait pas toujours exactement au même point, et il peut de ce fait y avoir des erreurs s'élevant à ± 0.1°, et même à ± 0.2° avec certains instruments. Une autre cause d'erreurs assez graves résulte de la détermination imparfaite de la profondeur où le thermomètre s'équilibre: ou bien par suite de rétractions irrégulières ou mal corrigées de la ligne

de chanvre, ou bien par l'inclinaison de la sonde, l'appareil thermométrique étant emporté par des courants profonds ou bien restant en place sous un bateau chassé par un courant de surface; dans certaines couches où la stratification thermique est très serrée, où le taux de la variation s'élève à 0.4 et 0.5° par mètre, un écart dans la mesure de la profondeur peut amener des erreurs de température arrivant à un ou plusieurs degrés.

Mais, la part légitime étant faite à ces accidents de l'observation, il n'en reste pas moins un fait évident, à savoir l'irrégularité de la courbe thermique dans la verticale; la propagation de la chaleur se fait irrégulièrement dans les couches moyennes et profondes du lac. Quelle est la cause de cette irrégularité ?

La plupart des actions qui réchauffent directement le lac ont un effet maximal à la surface et un effet progressivement décroissant dans la profondeur. La conduction thermique qui propage de molécule à molécule la chaleur livrée à l'eau par contact avec un air atmosphérique plus chaud, la conduction diathermique qui fait pénétrer à travers les couches diathermanes de l'eau la chaleur du soleil rayonnée directement par l'astre ou réfléchie par les corps réchauffés par lui, tous les phénomènes de conduction qui président au réchauffement du lac devraient, semble-t-il, s'ils étaient seuls actifs et régulièrement actifs, donner une courbe thermique verticale régulière.

Il y a deux causes aux irrégularités constatées :

a. Les intermittences de réchauffement et de refroidissement qui font alterner des phases de stratification et des phases d'uniformisation thermique. Tantôt c'est un retour de froid qui, au milieu du printemps, refroidit la surface du lac surchauffée auparavant par un beau temps précoce ; tantôt, et c'est un fait normal qui se reproduit chaque jour, le froid nocturne de la période journalière amène l'uniformisation des couches supérieures stratifiées par l'action solaire dans la phase diurne.

Nous aurons à traiter longuement cette dernière question quand nous arriverons à l'étude de la variation périodique journalière dans la thermique du lac, et nous expliquerons à cette occasion la curieuse anomalie de la stratification thermique dans les eaux de surface jusqu'à 20 mètres de profondeur.

b. Les actions de convection font descendre accidentellement dans les couches moyennes et profondes des masses d'eau de

surface qui, par le fait de leur température plus élevée, vont anormalement réchauffer les couches où elles pénètrent ; d'une part la convection hydrostatique dans laquelle l'eau littorale est alourdie par les poussières de la vase soulevée par les vagues, dans laquelle l'eau d'un affluent est alourdie par l'alluvion en suspension qu'elle charrie ; d'une autre part la convection mécanique dans laquelle l'eau de surface, accumulée par un grand courant d'air dans le littoral sous le vent, est obligée de chercher une voie pour son courant de retour dans les couches moyennes ou profondes, est ainsi chassée dans des couches inférieures à celles que sa densité lui commanderait. Les actions de convection sont essentiellement accidentelles ; elles amènent dans les couches moyennes des réchauffements anormaux qui détruisent la régularité de la courbe thermique. C'est à elles que j'attribue les inflexions de la courbe que nous constatons dans les profondeurs de 20 à 80^{m}.

J'ai eu l'occasion de constater l'effet puissant sur la thermique du lac des courants de convection mécanique dans les conditions suivantes [1]. Le 16 mars 1887, j'avais mesuré la température du Léman et reconnu qu'elle s'était uniformisée pendant l'hiver, étant descendue à 5.3° dans toute l'épaisseur du lac et même à 5.2° dans la couche très profonde. Or le printemps avait été fort venteux ; les 9 et 10 avril, il a soufflé de fortes bises ; les bises des 2 et 6 mai ont été d'intensité extrême. Immédiatement après, le 10 mai, j'ai opéré un sondage thermométrique qui m'a montré une propagation de la chaleur jusqu'à des profondeurs étonnantes pour la saison. Voici quelques chiffres comparatifs de ces deux sondages :

PROFONDEUR	16 MARS N° 38	10 MAI N° 39	DIFFÉRENCE
0^{m}	6.1°	8.9°	+ 2.8°
20	5.3	8.0	+ 2.7
40	5.3	7.7	+ 2.4
80	5.3	5.7	+ 0.4
100	5.3	5.7	+ 0.4
140	—	5.5	+ 0.2
180	—	5.3	+ 0.1
300	5.2	—	—

La température de la surface, qui à la fin d'avril s'était élevée jus-

[1] C. R. Acad. Sc. Paris, CIII, 47. 1886.

qu'à 14°, s'est notablement abaissée à la suite des grandes bises de mai; les couches moyennes de 20 à 150m se sont réparti cette chaleur des couches supérieures; à 100m l'eau a gagné 0.4°, à 140, 0.2°. J'attribue aux courants mécaniques des grands vents la convection de la chaleur jusqu'à ces grandes profondeurs.

Nous reconnaissons ces anomalies de la courbe thermique jusque dans les couches de 50, 60, 80 mètres; nous devons donc admettre que l'action réchauffante des phénomènes de convection descend jusqu'à ces profondeurs. Cela nous explique la propagation de la chaleur estivale jusqu'à des couches aussi éloignées de la surface, l'existence des variations périodiques annuelles jusqu'à 80 et 100m de fond. Nous ne pouvons pas, en effet, attribuer une action aussi lointaine aux phénomènes de conduction.

La chaleur se propage par conduction thermique avec une lenteur extrême; il lui faut des années pour traverser une couche de dix mètres. La conduction diathermique va très peu profond; la plus grande partie de la chaleur rayonnée est absorbée par la surface; ce ne sont que des quantités minimes qui pénètrent dans les couches sous-jacentes. Si dans la variation périodique annuelle, dans le court espace de six mois de la phase de réchauffement, nous voyons les inflexions des isothermes se manifester jusqu'à 80 ou 100m de la surface, il faut donc qu'il y ait une autre cause que les phénomènes de conduction pour la transmission de la chaleur dans ces couches déjà profondes, et c'est aux phénomènes de convection que nous devons les attribuer.

Inclinaison des plans isothermes. Quelques sondages faits en 1885 dans diverses régions du lac ont montré que l'horizontalité absolue n'existe pas nécessairement dans les plans isothermes des couches moyennes du lac. Deux sondages simultanés aux deux extrémités du lac ne donnent pas nécessairement la même température à la même profondeur sous la surface. Les recherches se sont bornées au Grand-lac; dans le Petit-lac, il y a des conditions si particulières que sa température peut différer souvent considérablement de celle du Grand-lac, comme nous le verrons plus loin.

Voici les observations sur lesquelles je fonde mon affirmation : Je ne donne que les chiffres des couches plus profondes que 30m.

D'abord quatre sondages faits du 9 au 13 juillet 1885 à Chillon, Evian, Morges et Yvoire. (Nos *23* à *26*.)

	CHILLON 9 juillet N° 23	ÉVIAN 12 juillet N° 24	MORGES 13 juillet N° 26	YVOIRE 12 juillet N° 25
30m	10.4°	9.7°	10.2°	8.8°
40	8.9	8.2	9.0	7.4
50	8.5	7.4	6.8	6.6
60	8.0	6.8	6.5	—
70	—	6.6	—	—
80	—	—	—	—
90	—	6.3	—	—
100	6 8	—	—	—

A égale profondeur, les couches d'eau étaient plus chaudes à Chillon, extrémité orientale du lac, qu'à Evian et Morges, milieu du Grand-lac ; à Evian et Morges qu'à Yvoire, extrémité occidentale du Grand-lac. Les plans isothermes des couches de 30 à 100m allaient donc, ces jours-là, en se relevant de Chillon à Yvoire.

Une seconde série de sondages a été faite le 18 août 1885 de Vevey aux bouches du Rhône (Nos *30* à *33*). En voici les chiffres :

	CREUX DE PLAN (1) N° 30	TOUR-DE-PEILZ N° 31	BOUCHES DU RHÔNE N° 32
30m	10.8°	12.1°	11.9°
40	7.5	8.6	8.8
50	6.7	7.1	6.8
60	6.4	6.5	—
80	6.1	6.1	—
100	5.9	6.0	—

Tous les sondages de Creux de Plan donnent des chiffres plus bas que ceux de la Tour de Peilz et des bouches du Rhône ; le sondage de 40m est de même plus froid que celui d'égale profondeur aux bouches du Rhône. Quoiqu'il y ait quelques irrégularités dans la variation, il semble qu'ici aussi les plans isothermes aillent en se relevant à mesure que l'on s'éloigne des bouches du Rhône.

Une troisième comparaison peut être faite entre les mêmes sondages du 18 août dans la partie orientale du Haut-lac avec un sondage du 18 septembre (N° *34*) fait à Yvoire.

(1) Le Creux de Plan est le golfe à l'ouest de Vevey, la Tour-de-Peilz est à l'est. Le sondage du Creux de Plan a été fait à 8km des bouches du Rhône, celui de la Tour-de-Peilz à 6km.

	Moyenne des sondages du 18 août dans le Haut-lac.	YVOIRE 18 septembre
	Nos 30 à 32	No 34
30m	11.6°	9.8°
40	8.3	7.3
50	6.9	6.1
60	6.4	5.9

Ici encore il y a inclinaison évidente des plans isothermes qui descendent notablement plus bas dans le Haut-lac qu'à Yvoire. (1)

Ces trois séries d'observations sont assez conformes pour que nous soyons autorisés à énoncer comme probable une loi d'après laquelle les plans isothermes pourraient être inclinés dans le lac ; ils seraient plus profonds à l'extrémité orientale qu'à l'extrémité occidentale du Grand-lac, ou mieux dit près des bouches du Rhône que loin de l'entrée de l'affluent principal du Léman.

Voici comment j'essaie d'expliquer le phénomène (2). Le lac de l'été est constitué par des couches stratifiées thermiquement, les plus chaudes surmontant les plus froides. Si l'eau était partout de même nature, pour qu'il y ait équilibre hydrostatique, la stratification devrait être uniforme, et les plans isothermes seraient parallèles à la surface du lac. Mais l'extrémité orientale du Léman reçoit l'apport des eaux glaciaires du Rhône, eaux chargées d'alluvion, par conséquent relativement lourdes ; une partie des eaux de l'affluent descend dans les grands fonds du lac, une partie aussi se mélange avec les eaux lacustres voisines. Les eaux du Haut-lac sont donc moins pures que celles des régions du Léman plus distantes du Rhône ; elles sont par conséquent plus lourdes et l'équilibre hydrostatique serait, de ce fait, détruit, s'il n'y avait compensation d'autre part. Cette compensation est fournie par la différence de densité résultant de la température des eaux. Les eaux chaudes s'accumulent en plus grande épaisseur dans le Haut-lac ; les couches isothermes y sont plus épaisses, et par conséquent

(1) Si l'on m'objectait qu'il s'est écoulé un mois entre les deux sondages d'août et septembre 1885 et que pendant ce temps le lac a pu se réchauffer, je répondrai que la différence étant dans le sens que nous donnent les expériences, si l'on supprimait ce réchauffement probable, les différences en seraient accrues d'autant.

(2) Inclinaison des couches isothermes dans les eaux profondes du Léman. C. R. Acad. Sc. Paris, CII, 712. 1886.

une colonne d'eau de même hauteur, indépendamment de sa surcharge d'alluvion, y est plus légère qu'à l'autre extrémité du lac. L'eau du Haut-lac, plus lourde par le fait de l'alluvion qu'elle porte, plus légère par le fait d'une température plus élevée, fait équilibre aux eaux plus pures, mais plus froides du détroit de Promenthoux. L'équilibre hydrostatique est ainsi rétabli.

Si des recherches ultérieures confirmaient la réalité des faits que j'ai cru constater en 1885, ce serait dans un tel ordre de considérations qu'il faudrait en chercher l'explication.

II. VARIATION CYCLIQUE

Les variations cycliques du climat par lesquelles, pendant une série d'années, la région de la terre que nous considérons reçoit plus ou moins de chaleur que la normale, ces variations cycliques, qui sont si difficiles à mettre en évidence dans l'atmosphère où elles sont voilées par la complication extrême des diverses périodicités et des cas accidentels, apparaissent beaucoup plus simplement dans la thermique des lacs où les effets s'additionnent et s'emmagasinent à longue échéance. Nous les constaterons plus loin, quand nous étudierons le bilan thermique du lac. Pour le moment, nous ne voulons parler que d'une variation cyclique très curieuse, très importante, qui se manifeste dans la région profonde des lacs et qui nous a été révélée par les sondages thermométriques.

Nous venons d'établir que les variations périodiques annuelles ne se font pas sentir à plus de 80 ou 100^{m} au-dessous de la surface, et cependant nous constatons des variations de la température abyssale du lac d'assez grande amplitude. Voici les chiffres que nous possédons sur la température des couches profondes du lac. Les unes ont été mesurées directement dans le fond, les autres résultent de la température pélagique constatée dans les mois d'hiver ; les premières ne réclament pas d'autres corrections que celles qui doivent être apportées pour des erreurs d'observation ; les autres peuvent être trop élevées si la stratification thermique se continuait dans des couches plus basses que celles où s'est fait le sondage thermométrique, mais ce sont certainement des valeurs maximales, la température profonde ne pouvant pas être plus chaude.

Thermomètre protégé	H.-B. de Saussure	Février	1779	300m	5.4°
Thermométrographe	H. de la Bèche	Septembre	1819	300	6.4 (?)
Méthode du limon	F.-A. Forel	Février	1870	90	5.2
—	—	Mars	1871	65	5.4
—	—	Juillet	1873	260	5.9
—	—	Février	1874	50	5.5
Negretti et Zambra	—	Mai	1879	210	5.2
—	—	Mai	1880	300	4.4
—	—	Novembre	1881	280	4.7
—	—	Février	1883	300	4.9
—	—	Août	1884	290	5.1
—	Hörnlimann	Septembre	1885	240	5.6
—	F.-A. Forel	Juin	1886	300	5.0
—	—	Mars	1887	120	5.1
—	—	Septembre	1889	300	4.7
—	Delebecque	Janvier	1891	300	4.0
—	—	Juin	—	300	4.1
—	—	Janvier	1892	300	4.15
—	—	Mars	—	300	4.4
—	—	Février	1894	300	4.65

D'après ces chiffres, il y a variation dans la température des couches profondes du Léman, par 200 et 300m, bien plus bas que les limites de la variation annuelle. La variation que nous appelons cyclique s'étend jusqu'au plus profond du lac.

Les limites de cette variation sont assez étendues. Si nous écartons le chiffre de la Bèche (1819) dont le thermométrographe non protégé contre la pression devait donner des températures trop élevées, nous trouvons comme température extrême 5.9° en 1873, et 4.0° en 1891; amplitude de la variation 1.9°.

Les allures de la variation sont étranges. Pendant une série d'années on voit la température des couches profondes se relever lentement, sans interruption, sans retour en arrière. Ainsi de 1880 à 1885, la température monte de 4.4 à 5.6°; de 1891 à 1894 de 4.0 à 4.6°. Pendant ces séries d'années, il y a réchauffement continu à raison de 0.1°, de 0.2° ou de 0.3° par an.

Puis, subitement, dans le courant d'un hiver, nous voyons la température s'abaisser, parfois de quantités considérables :

dans l'hiver de 1879 à 1880 elle passe de 5.2 à 4.4°
— 1890 à 1891 — 4.9 (?) à 4.0

Il y a échauffement progressif et continu dans les années ordinaires, refroidissement subit dans les grands hivers.

Le procès du refroidissement rapide dans le cours d'un hiver est le plus facile à comprendre. Nous avons vu que par le fait de la convection thermique, à mesure que la surface du lac se refroidit, la tempéra-

ture s'uniformise en s'abaissant simultanément dans une couche de plus en plus épaisse; que successivement la couche de température uniforme, dont le degré de chaleur décroît progressivement, s'annexe, par un procédé compliqué de descente des eaux refroidies, des couches de plus en plus éloignées de la surface. Si l'hiver est rude, si l'hiver se prolonge, ce procès qui se limite ordinairement aux couches de 80 à 120^{m} peut atteindre les eaux les plus profondes, et alors il y a refroidissement de toute la masse, de toute l'épaisseur du lac. La planche VIII, page 353, qui figure entr'autres l'effet du *grand hiver* de 1880, montre en particulier le refroidissement des couches profondes par l'ascension verticale des isothermes 5.0° et 4.8°, qui n'étaient pas représentées dans l'été de 1879.

Dans l'intervalle entre deux grands hivers, le procès inverse, celui du réchauffement, continue sans interruption (1). Quand l'hiver n'est pas assez rude ou pas assez prolongé pour abaisser la température de surface au degré de froid des eaux profondes, celles-ci ne sont pas atteintes par la convection thermique; la chaleur acquise l'année précédente reste gagnée et le thermomètre indique un relèvement de température dans le fond du lac. Voyez par exemple, dans la planche VIII, la descente des isothermes 5.5°, 5.0°, 4.8°, 4.6° de l'année 1880 à 1881; cette descente des isothermes dans des couches de plus en plus profondes indique un réchauffement de ces couches.

Quelles sont les causes du réchauffement des couches très profondes du lac? La question est importante et intéressante. Eliminons tout d'abord l'hypothèse qui attribuerait le réchauffement des couches profondes à la chaleur propre de la terre. La chaleur terrestre, qui se propage par conductibilité à travers le sol du plafond du lac, doit tendre à réchauffer de bas en haut les couches profondes de l'eau et à les uniformiser si elles sont en stratification directe. Mais cette cause de réchauffement est trop faible pour que nous puissions la faire entrer en considération. Nous en avons déjà indiqué (p. 295) la valeur d'après les recherches récentes. Elle élèverait dans le cours d'une année de :

1°	une couche d'eau de	0.41^{m}	d'épaisseur.
0.1°	»	4.1^{m}	»
0.01°	»	41^{m}	»
0.004°	»	100^{m}	»

(1) Sans interruption apparente à nos méthodes de thermométrie. Je ne veux pas dire que le réchauffement ait lieu été comme hiver, sans retour en arrière ou sans ralentissement. Nous ne les avons pas jusqu'à présent constatés.

Nous devons la traiter comme une quantité négligeable.

Nous avons vu que, dans les couches moyennes, entre 20 et 100^{m} de profondeur, les courants de convection mécanique déterminés par les vents jouent un rôle prédominant pour amener les irrégularités d'allure constatées dans la courbe thermique de la stratification estivale; nous en avons conclu que ces courants sont l'agent principal du réchauffement des couches moyennes.

Mais il est difficile de leur attribuer une action sur les plus grandes profondeurs du lac; les courants de retour des grands vents, pour autant que nous le savons [1], sont limités aux couches supérieures et moyennes : les pêcheurs les constatent à 20, à 40, à 60^{m} de profondeur. C'est un cas tout à fait exceptionnel que celui du 20 février 1879, dans lequel on les a vu remuer le lac jusque dans les plus grands fonds (page 281). Jusqu'à correction par des observations positives, j'attribuerai donc peu d'importance pour le réchauffement des couches profondes aux courants de convection mécanique.

Les courants de convection hydrostatique ont au contraire une action très efficace. Ils sont causés par la différence de densité qu'amène la surcharge de certaines masses d'eau par l'alluvion en suspension.

Ainsi que je l'ai démontré [2], l'alluvion impalpable en suspension dans l'eau augmente la densité de celle-ci du poids même des poussières, moins le volume d'eau déplacé par elles. Toute eau trouble est donc, toutes choses égales d'ailleurs, plus lourde que de l'eau claire, et la différence de densité qui résulte de cet alourdissement peut être assez grande pour dépasser en importance la différence de densité provenant de la température. Donc des eaux de surface chaudes, ou des eaux d'affluents, si elles sont suffisamment chargées d'alluvion, peuvent être rendues plus lourdes que les eaux claires du lac, même que les eaux très froides des grands fonds. Donc ces eaux chaudes descendront le long des talus du lac, arriveront sur le plafond de la cuvette et s'y étaleront en couche horizontale ; la conduction thermique interviendra

[1] J'insiste sur cette réserve : pour autant que nous le savons. Nous connaissons très mal les allures des courants de surface, nous n'avons que quelques indices souvent trop indirects sur les allures des courants profonds. Leur étude, très difficile du reste, a été jusqu'à présent complètement négligée par l'observation scientifique.

[2] T. I., p. 367.

alors et réchauffera les eaux du fond du lac, par communication à celles-ci de la chaleur des eaux chargées d'alluvion.

Nous connaissons deux occasions dans lesquelles le phénomène peut se manifester :

a. Dans le cas d'un grand vent, le littoral à la côte sous le vent est balayé par des vagues puissantes, la vase de la beine est soulevée et mise en suspension dans l'eau ; l'eau littorale devient plus lourde, et, par convection hydrostatique, il se développe un courant descendant qui gagne les grands fonds du lac. Je n'ai pas les éléments pour apprécier l'importance numérique d'un tel procédé de réchauffement des couches profondes.

b. L'eau des affluents débordés par une pluie d'orage ou grossis par la fonte des neiges est fortement chargée d'alluvion ; elle est lourde et elle descend dans les grands fonds du lac. C'est ce qui a lieu en particulier pour le Rhône d'été dont les eaux grisâtres se jettent en grande abondance dans le lac. Essayons d'appliquer un calcul approximatif à ce phénomène.

Après avoir reconnu que, d'après les chiffres donnés par nous pour le transport moyen d'alluvion et pour la température du Rhône dans l'été de 1886 (1), l'eau du fleuve avait constamment une densité plus grande que celle de l'eau du lac à 5.0°, j'ai pris pour base de mes calculs les données suivantes :

Le débit du fleuve dans l'été de 1886 et sa température moyenne étant :

		DÉBIT	TEMPÉRATURE
Mai	1886	132 m3 sec	10.5°
Juin	—	199	10.5
Juillet	—	362	9.7
Août	—	282	9.7
Septembre	—	227	9.3

Cela représente un volume total de 3082 millions de mètres cubes apportant au lac une quantité de 30 274 milliards de calories au-dessus de 0°.

D'autre part, j'ai mesuré le volume des couches profondes du lac et leur ai attribué la température que nous ont appris les sondages du 25 juin 1886, *N° 41*.

(1) T. I., p. 364 et 375.

			VOLUME DU LAC		TEMPÉRATURE
Au-dessous de l'isobathe	300m		368	millions m3	5.0°
entre	250m	et 300	3901	—	5.0
—	200	250	7567	—	5.1
—	150	200	10785	—	5.2
—	100	150	13875	—	5.4

Soit un volume total, au-dessous de l'isobathe de 100m, de 36 496 millions de mètres cubes, ayant emmagasiné une quantité de 190 944 milliards de calories au-dessus de 0°.

Si nous mélangeons ces deux masses d'eau, nous obtenons une température moyenne de 5.59°, soit 5.6°.

Par conséquent, par le fait seul de l'entrée de l'eau du Rhône et de sa descente dans les profondeurs du lac, pendant l'été de 1886, la température des couches profondes se serait réchauffée de 0,6°, en passant de 5.0° à 5.6°. Ce calcul nous montre que malgré son apparence paradoxale, la formule est exacte, qui dit : Le Rhône, fleuve glaciaire, réchauffe les couches profondes du Léman. Cette formule est exacte ; car c'est parce qu'il est fleuve glaciaire, que le Rhône est chargé de limon et amène en été ses grandes eaux qui sont plus lourdes que celles du lac. Il réchauffe le lac parce que, alors même qu'il est un fleuve glaciaire, ses eaux d'été se sont assez réchauffées dans la traversée du Valais pour être plus chaudes que les eaux profondes du Léman, avec lesquelles elles vont se trouver en contact.

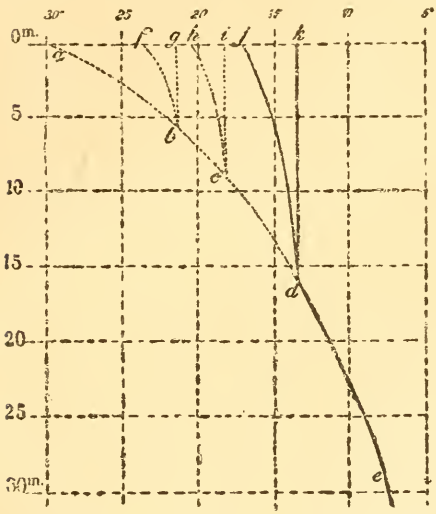
Une seule chose doit nous étonner, c'est la valeur considérable de l'élévation de température que nous indique ce calcul : 0.6° c'est beaucoup plus que le taux normal du réchauffement que nous ont montré les sondages thermométriques ; ceux-ci nous ont donné pour l'élévation de température des couches profondes d'une année à l'autre 0.1, ou 0.2, ou au plus 0.3°. Il doit donc y avoir, pour contrebalancer le puissant réchauffement de la convection hydrostatique, une cause de refroidissement que nous avons jusqu'à présent négligée. Nous la trouverons plus loin lorsque nous étudierons le refroidissement de la région littorale en hiver.

III. VARIATION JOURNALIÈRE

Nous avons vu que la surface du lac varie de température dans la période journalière ; la variation du lac est plus faible que celle de la température atmosphérique, mais elle s'élève encore dans les mois

d'été à 2° environ, et elle peut atteindre 4° dans des cas exceptionnels. Cette variation se fait-elle sentir dans les couches sous-jacentes ? Jusqu'à quelle profondeur se fait-elle sentir ? Comment la variation se traduit-elle dans les courbes thermiques ?

Supposons que la périodicité journalière n'existe pas encore dans les actions thermiques qui opèrent sur le lac ; supposons que, les vingt-quatre heures durant, comme cela a lieu au pôle en été, le soleil réchauffe constamment la surface de l'eau, sans variation sensible dans l'intensité de l'action. Dans ce cas la chaleur irait régulièrement et progressivement en croissant [1] dans les couches de plus en plus rapprochées de la surface : celle-ci serait surchauffée, et la courbe thermique serait de la forme *a b c d e*, fig. 111. Faisons intervenir dans une telle stratification le refroidissement nocturne d'une première période journalière ; la surface perdra de la chaleur, il y aura uniformisation d'une couche de plus en plus épaisse qui, à la fin de la nuit, aura la même température sur toute sa hauteur ; la courbe prendra la forme *g b c d e*. Pendant la phase diurne suivante, la chaleur agissant de nouveau, il y aura production d'une nouvelle stratification, mais elle sera moins accentuée que celle de notre supposition primitive, et la courbe, à la fin de la première journée, aura la forme *f b c d e*. La nuit suivante, nouvelle uniformisation ; mais la stratification précédente ayant été moins fortement marquée, la couche uniformisée par le refroidissement nocturne sera plus épaisse, et la courbe thermique de la seconde nuit prendra la forme *i c d e*, et la courbe de la seconde



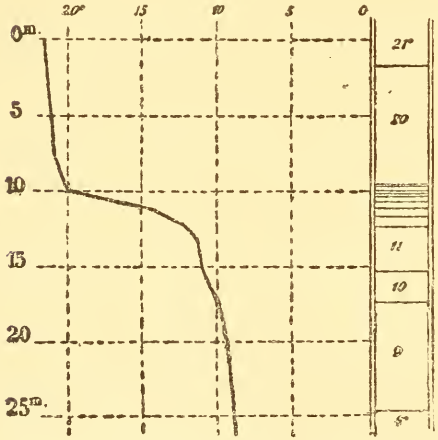
(Fig. 111.) Schéma de la formation de la couche de surface.

[1] Je fais abstraction dans cette hypothèse des courants de convection mécanique.

journée *h c d e*. Et ainsi de suite : d'uniformisation nocturne à stratification diurne, la courbe aboutira à un état d'équilibre stable, oscillant entre les positions *k d e* à la fin de la nuit, à *j d e* à la fin de la journée.

Cet état de régularité idéale sera modifié d'une part par les irrégularités accidentelles dans les actions réchauffantes et refroidissantes des phases alternatives de la période journalière ; il sera modifié d'autre part par l'intervention des courants de convection mécanique, des actions de mélange déterminées par les vents et les vagues. Mais, en somme, cette courbe thermique plus ou moins bien développée devra se retrouver dans la superposition des couches supérieures du lac.

Nous devons donc avoir dans les eaux supérieures du lac stratifié en été une couche de surface plus ou moins épaisse, de température à peu près uniforme, relativement chaude, dans laquelle apparaissent, par une stratification peu serrée, les actions réchauffantes de la journée. Au-dessous de cette couche de surface, les variations journalières ne se font plus sentir ; les eaux sont énergiquement stratifiées ; l'on arrive fort vite à des eaux relativement froides, et la courbe thermique avec un taux rapide de refroidissement progressif doit reprendre ses allures régulières. (1)



(Fig. 112.) Courbe thermique du 21 juillet 1891. Eaux de surface.

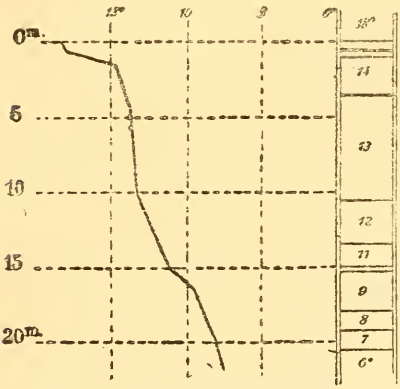
C'est ce qui a lieu en réalité. J'en donnerai un exemple dans le sondage thermométrique N° *17*, du 21 juillet 1881, où j'ai serré suffisamment les mesures pour avoir les allures de la courbe thermique dans les eaux de surface. J'indique dans la troisième colonne le taux de la variation thermique en centièmes de degré pour une épaisseur de un mètre.

(1) J'ai, pour la première fois, indiqué cette explication de la couche de surface dans mon Léman, précis scientifique, p. 35. Bâle et Genève, 1886.

N° 17. Ouchy. *21 juillet 1881.* Grand beau. Calme.

0m	21.3°	
1	21.2	10 centièmes de degré
5	20.9	7
7.5	20.6	12
10	19.8	32
11	14.4	540
12	12.1	230
13	11.3	80
14	11.3	0
15	11.1	20
17.5	9.9	9
20	9.4	2
25	8.9	10

La fig. 112 représente graphiquement ces allures, soit à gauche dans une courbe thermique par abscisses et ordonnées, soit à droite dans une échelle dont les gradins indiquent les limites des couches différant de un degré.



(Fig. 113.) Courbe thermique du 22 juin 1891. Eaux de surface.

Les proportions de cette couche uniforme d'eau de surface sont très variables. Quelquefois son épaisseur est très faible, ainsi par exemple le sondage N° *50*, 22 juin 1891, de M. Delebecque : elle formait une première couche d'un mètre d'épaisseur, très chaude, à 18°, puis une seconde couche de 13 à 14° occupant les dix mètres suivants ; au-dessous seulement commençait la stratification plus ou moins régulière de la courbe thermique, (fig. 113).

Voici les valeurs numériques de ce sondage intéressant, avec le taux de la variation par mètre, en centièmes de degré.

N° 50. 22 juin 1891. A 3km au large d'Evian. Beau, calme.

0m	18.0°	
		60 centièmes de degré
0.5	17.7	
		300
1.5	14.7	
		35
3.5	14.0	
		20
4.5	13.8	
		11
10.0	13.2	
		42
15.2	11.0	
		110
16.3	9.8	
		60
17.3	9.2	
		47
20.5	7.7	

D'autrefois la couche de surface a une beaucoup plus grande épaisseur. Ainsi quand le 23 septembre 1884 (N° 22) j'avais les températures et le taux de variation suivants :

0m	17.7°	
		0 centièmes de degré
10	17.7	
		25
20	15.2	
		34
30	11.8	

j'estime que je me trouvais là en présence d'une couche de surface de près de 20 mètres de hauteur.

Ainsi s'explique facilement le phénomène qui a tant préoccupé nos amis les limnologues allemands, et que Richter a très bien appelé, en en donnant la même explication que moi, la Sprungschicht (1) la couche du saut thermique. Au-dessous de la couche de surface à température presque uniforme, où le taux de variation est très faible ou nul, on arrive brusquement à des couches où le thermomètre baisse subitement, où le taux de variation devient énorme. Dans notre exemple du 21 juillet 1881, la couche du saut était entre 10 et 12 mètres ; entre la surface et 10 mètres de profondeur la température était de 20° environ, à partir de 12 mètres la température descendait subitement à 12° et moins ; en deux mètres d'épaisseur d'eau la température s'abaissait de 7°. Je ne puis attribuer une grande importance à la couche du saut, et je ne vois à sa constatation qu'un procédé pratique de limiter facilement la couche des eaux de surface. Les eaux de surface s'éten-

(1) *E. Richter.* Die Temperatur-Verhältnisse der Alpenseen. Berlin 1891.

dent jusqu'au point où l'on reconnaît la variation rapide du thermomètre pour un approfondissement minime.

C'est cette couche des eaux de surface qui est à mes yeux le phénomène important et intéressant. C'est en effet une couche nettement séparée des eaux sous-jacentes par sa densité beaucoup plus faible ; elle en reste distincte pendant l'été, aussi longtemps que des courants de convection mécanique des grands vents ne l'auront pas fait disparaître par mélange avec les eaux plus profondes, aussi longtemps que la convection thermique de l'automne, en en augmentant progressivement l'épaisseur, ne l'aura pas anéantie.

C'est dans cette couche que les eaux légères des affluents demeurent localisées en paquets distincts qui peuvent garder longtemps leur individualité et conserver leur composition chimique particulière (voyez plus loin). Dans ces eaux de surface s'accumule la pluie qui, pendant les saisons humides, peut diluer extraordinairement l'eau du lac ; ce sont ces eaux de surface qui s'évaporent dans l'atmosphère et se concentrent pendant les saisons sèches.

Les eaux de surface peuvent donc présenter une composition variable et, quoique perdues dans la masse du lac, garder localement plus ou moins longtemps les caractères d'eau de rivières, d'égouts ; elles n'ont pas la belle homogénéité des eaux des couches moyennes qui représentent l'eau lacustre par excellence. C'est au-dessous de ces eaux de surface, dans les couches relativement froides des eaux moyennes du lac, que l'hygiéniste devra aller chercher des eaux convenables pour l'alimentation d'eau d'une cité. Je fixe à 15 ou 20^{m} la profondeur limite des eaux de surface dans les temps de développement maximal de leur épaisseur. Pour plus de prudence, je conseillerai de ne pas établir la prise d'une bonne eau alimentaire à une profondeur plus faible que 25 ou 30^{m}.

En résumé, je reconnais dans la thermique du lac trois phénomènes de variation périodique bien nettement caractérisés :

La variation journalière qui est limitée dans les eaux de surface jusqu'à 5, 10 et 20 mètres de profondeur.

La variation annuelle qui se fait sentir jusqu'à 80, 100 et 120^{m}.

La variation cyclique qui se manifeste jusqu'aux plus grandes profondeurs du Léman, à 300^{m}. Il est probable que si notre lac, dans les mêmes conditions climatiques, avait une profondeur infinie, disons

mille mètres ou plus, la variation cyclique serait tellement faible dans les grands fonds qu'elle y serait nulle ; la température y serait constamment à 4°. La discussion de cette allégation nous entraînerait trop loin du Léman actuel.

D. *La température des couches profondes du Petit-lac.*

Nous n'avons jusqu'à présent parlé que du Grand-lac ; nous avons laissé de côté ce qui concerne le Petit-lac. Celui-ci a en effet des allures thermiques qui le séparent complètement de la grande masse du lac pendant les temps froids de l'hiver ; nous nous occuperons bientôt de cette question. Mais en dehors de la saison hivernale, il se comporte comme partie intégrante du Léman.

Nous possédons deux séries intéressantes d'études sur cette région du lac.

I. M. l'ingénieur Th. Turrettini, président du conseil administratif de la ville de Genève, a eu l'obligeance de me communiquer une série d'observations thermométriques qu'il a faites faire en 1890 et 1891 à l'entrée de la rade de Genève, depuis la surface jusqu'au fond. Il avait choisi quatre stations distantes l'une de l'autre de 200^{m} environ, la plus éloignée, celle dont nous donnerons les chiffres, à environ 2400^{m} de la jetée du port de Genève. Les valeurs comparables des lectures thermométriques faites dans les quatre stations n'ont jamais différé de plus de $^{1}/_{2}$ degré ; ce qui est une garantie du soin apporté aux observations. Voici, p. 367, le tableau complet des observations faites à la 4e station, devant Chambésy, en un point où le lac mesure 30^{m} de profondeur. (1)

De cette belle série d'observations, je tire entr'autres les faits suivants :

1° Les recherches suivies régulièrement chaque semaine des mois d'été montrent, mieux que nos séries isolées ou accidentellement espacées dans le Grand-lac, le réchauffement progressif des couches supérieures de l'eau. En laissant, pour le moment, de côté les observations du 22 juillet et du 28 août qui représentent des cas accidentels, nous voyons en particulier que :

a. La différence entre la couche de 10^{m} et la surface, qui s'élève en

(1) Les mesures thermométriques étaient prises en fractions de quarts de degrés. Pour faciliter la lecture, je les ai transformées en fractions décimales.

Dates			0m	10m	20m	30m	Notes météorologiques.
1890	juillet	17	—	—	—	8.0	
		18	20.0	15.5	12.5	7.5	
		22	17.2	16.2	15.7	14.0	après 3 jours de bise.
		24	17.7	12.2	7.5	6.2	2 jours après la bise.
		30	20.5	15.0	11.0	9.0	petite bise.
	août	1	22.0	15.5	9.7	8.7	séchard (1) assez fort.
		12	19.5	14.0	12.2	8.5	légère bise.
		21	20.5	18.5	14.0	9.5	calme.
		28	12.2	10.0	9.0	8.0	après fort vent et pluie.
	septembre	10	16.5	15.5	15.0	11.5	après plusieurs jours de bise.
		12	16.5	15.2	15.0	7.5	après 2 jours calmes.
		20	17.0	15.5	14.0	10.7	calme.
		30	16.7	15.5	15.0	9.5	
1891	octobre	1	15.0	15.0	15.0	7.5	2 jours de bise et 3 jours calmes.
		12	15.0	14.5	11.5	8.7	calme, pluie.

juillet à 4° et plus, descend à partir de la moitié d'août à 1° environ.

b. La couche de 20m est en juillet entre 7° et 12°, en septembre de 14° à 15°.

c. Une observation complémentaire du 7 octobre 1891 montre que la couche d'eaux chaudes descend jusqu'à 25m ; en voici les chiffres :

de 0 à 20m	15.0°
— 25m	14.5°
— 30m	7.5°

d. La couche de 30m n'est pas sensiblement affectée par ce réchauffement progressif des couches supérieures ; mais sa température est irrégulièrement variable, ce que l'on doit attribuer aux courants de convection.

2° Les sondages thermométriques du 28 août montrent d'une manière évidente l'effet de refroidissement d'un vent sudois qui a sévi la veille. Dans les notes de l'Observatoire à cette date on lit : « très fort vent de 16 à 19h, violent vent et très forte averse à 18h 55min, etc. » Le vent du S. W. a balayé les couches de surface, les a chassées loin de Genève et les a fait

(1) A Genève, l'on désigne par le terme de *séchard* la brise diurne que nous avons appelée le rebat.

remplacer par les eaux profondes amenées par les courants de retour. La différence en refroidissement, du 21 au 28 août, s'élève à :

surface	8.3°
10m	8.5
20	5.0
30	1.5

3° L'effet inverse d'un vent du nord est démontré par les mesures du 22 juillet. Depuis plusieurs jours, le temps était à la bise ; les notes de l'Observatoire portent pour le 20 juillet « forte bise à 13h », pour le 21 « forte bise de 13h à 19h ». Les eaux de surface ont été accumulées dans le cul-de-sac du golfe de Genève et y ont pris une épaisseur extraordinaire. A 30m de profondeur, la température était encore de 14°, ce qui représente seulement 3.2° en moins que les eaux de surface.

4° L'épaisseur extraordinaire de la couche chaude dans l'observation du 7 octobre (elle descend jusqu'à 25m), doit-elle être attribuée à la bise qui soufflait 3 jours auparavant et qui avait été suivie par le calme ? je ne puis le croire, et j'y vois plutôt l'effet du réchauffement progressif des couches supérieures à la fin des mois d'été.

II. M. Paul van Berchem a fait, de 1891 à 1893, 9 séries de sondages

	1891							1892	1893
	18 juillet	7 août	1 septemb.	17 septemb.	5 octobre	24 octobre	4 novemb.	1 octobre	31 octobre
0m	19.9°	15.7°	19.0°	18.6°	15.7°	14.6°	11.8°	17.7°	13.5°
1	19.1	15.7	19.0	18.6	15.7	14.6	11.8	17.6	13.5
5	18.0	15.5	17.0	18.4	15.2	14.6		16.2	13.5
10	14.0	14.4	16.0	18.4	15.2	14.4	11.8	15.4	13.2
20	10.1	12.8	12.1	17.8	15.1	13.0	11.8	12.6	13.2
25									10.8
30	7.2	10.8	7.4	12.0	13.3	9.8	11.8	9.4	8.7
35							11.8		
40	5.8	8.6	5.8	8.2	5.0	6.5	11.3	7.6	7.4
45							9.7		
50	4.7	6.4	5.1	5.4	5.0	5.6	6.5	6.4	6.0
60								5.6	5.2
65	4.6	4.8	4.8	5.1	4.7	4.9	5.4	5.6	5.2

thermométiques dans la fosse de Tougues, au large de Céligny. Son appareil est un Negretti et Zambra. Voici, p. 368, les chiffres qu'il a publiés. (1)

De cette intéressante série d'observations, je tire entr'autres les faits suivants :

a. Si je prends la moyenne des températures mesurées dans les 9 séries j'obtiens pour les diverses profondeurs des valeurs qui me donnent le taux de la variation pour une couche d'un mètre en centièmes de degré.

	Température moyenne	Taux de variation par mètre
0m	15.8°	
		10 centièmes de degré
1	15.7	
		2
5	15.6	
		14
10	14.9	
		17
20	13.2	
		32
30	10.0	
		26
40	7.4	
		17
50	5.7	
		5
65	5.0	

Les sondages d'où ces moyennes ont été tirées étant irrégulièrement distribués dans le cours de l'année, la prédominance des mois d'automne pendant lesquels les couches supérieures sont uniformisées efface un peu les allures de la variation thermique: si nous n'avions pris que les mois d'été, les différences auraient été encore plus exagérées. Cependant on y voit très nettement le taux de variation faible dans les couches supérieures atteindre son maximum de 20 à 40m de fond et décroître progressivement ensuite.

b. Dans les sondages de 1891, on suit l'uniformisation progressive des couches de surface qui descendent jusqu'à

10m	au 7 août
20	au 17 septembre et 24 octobre
40	au 4 novembre

c. M. van Berchem a fait une comparaison intéressante des sommes de chaleur emmagasinées dans le lac aux différentes époques. En sui-

(1) Archives de Genève, XXX, 676, 1898.

vant un procédé que nous étudierons plus tard à propos du bilan thermique du lac, il a calculé la somme de calories nécessaires pour élever une colonne verticale de 100^{cm^2} et de 65^m de hauteur, de 0° à la température indiquée par les sondages. Il a trouvé :

1891	juillet	18	5690 calories.
	août	7	6702
	septembre	1	6012
	—	17	7632
	octobre	5	6630
	—	24	6172
	novembre	4	6477
1892	octobre	1	6587
1893	octobre	31	6072

Il a constaté ainsi que dans l'été de 1891 le réchauffement avait duré jusqu'au 17 septembre, puis que le lac s'était refroidi ; mais il a reconnu dans ces procès de réchauffement et de refroidissement deux arrêts ou retour en arrière. Le 1er septembre le lac était, dans la région étudiée, moins chaud que le 7 août, ce que M. van Berchem attribue à la série de vents du sud qui ont régné dans les jours antérieurs, du 19 au 28 août : les eaux chaudes de surface du Petit-lac ont été balayées et entraînées dans le Grand-lac pour être remplacées par des eaux profondes froides ; ce refroidissement est très évident pour les couches de 30 à 50^m. — D'une autre part, le 4 novembre le lac était plus chaud que le 24 octobre. Le vent du nord avait soufflé du 27 octobre au 3 novembre ; il avait accumulé dans le Petit-lac l'eau chaude de surface du Grand-lac, et la couche de température uniforme (eaux de surface), qui n'avait que 20^m le 24 octobre avait 40^m le 4 novembre. Cet épaississement des eaux de surface n'était pas dû au refroidissement automnal ; en effet, la couche de 40^m s'était réchauffée de 4.8^o entre ces deux dates. C'est un fait analogue à celui que nous ont montré les sondages thermométriques de M. Turrettini du 22 juillet 1890 (v. p. 368).

Nous trouvons dans les études de MM. Turrettini et van Berchem une justification entière des notions que nous avons exposées sur les phénomènes de convection mécanique par l'action des vents, et sur leur application à la thermique du lac.

III. La congélation du Léman.

Les phénomènes de congélation des lacs ont un grand intérêt. D'une part, ils soulèvent quelques questions curieuses de physique ; d'une autre part, ils nous ouvrent des regards sur les faits climatiques des temps passés. Ils sont facilement observés ; ils attirent grandement l'attention du public et sont enregistrés dans les chroniques ; bien avant l'invention des thermomètres et l'organisation de la thermométrie météorologique, ils nous donnent des dates précises sur le climat et sur ses changements possibles.

Nous allons donc étudier avec attention la congélation du lac.

1. *Faits historiques.*

Et d'abord recherchons dans l'histoire et les chroniques les faits du passé.

1° Dans toutes les descriptions géographiques et historiques du Léman, on trouve rapporté que le lac a été gelé dans les années 762 et 805. Le récit est plus ou moins enjolivé dans les diverses chroniques ; nous nous bornerons à en citer une version : « Deux fois », dit L. Vulliemin, « en 762 et en 805, le miroir du Léman s'est couvert d'une glace assez profonde pour que de gais patineurs se soient élancés d'une rive à l'autre, et que même des chars aient traversé le lac de Nyon à Thonon ».[1]

Ce récit est purement légendaire, et cette légende est fausse. En remontant avec M. Favey aux sources [2], on arrive par Dellient aux *Antiquités de Genève*, et dans celles-ci à l'*Histoire genevoise* de Grégorio Leti, et enfin au fameux *Manuscrit de Prangins*. Or, toute anecdote relatée dans cette chronique doit être tenue pour suspecte. Le Manus-

[1] « Ils sont bien téméraires, ces patineurs contemporains de Pépin-le-Bref, » dit M. le prof. G. Favey dans un article de la Gazette de Lausanne, 24 avril 1880, où nous avons puisé la plupart des détails notés ici, « et celui qui nous les peint si gracieusement n'a-t-il pas quitté un instant la plume de l'histoire pour le crayon plus agile de l'artiste ? il les maniait si bien l'un et l'autre qu'il a pu s'y tromper. »

[2] *L. Vulliemin*, le canton de Vaud. Dictionnaires de *Lutz*, de *Marlignier*, etc.

crit de Prangins est une de ces chroniques fabuleuses où quelque mauvais plaisant s'est amusé à entasser les légendes les moins authentiques en les déguisant sous les graves dehors de l'histoire. La *Chronique de Vaud*, le *Manuscrit de Prangins*, etc., sont si peu sérieux que lorsqu'un historien, en présence d'un récit qui lui inspire des doutes, parvient à le retrouver dans les pages de ces chroniques, il obtient par cela même la démonstration de la fausseté de la légende. Quoi qu'il en soit, voici ce que nous lisons dans le Manuscrit de Prangins (1) :

762 : Il y eut un si grand froid que le Lac fut tout gelé, et après cela une si grande chaleur qu'elle se changea en peste et plusieurs milliers de personnes en moururent.

805 : Cette année fut célèbre par plusieurs prodiges. Le soleil fut éclipsé d'une si grande obscurité pendant 15 jours et le froid si grand que des chariots traversaient sur la glace de Tonon à Nion *[sic]*.

D'après les notes de M. le prof. Favey, l'histoire a enregistré une année de grande froidure vers 762 à 765, en 764 d'après les chroniques de Neuchâtel (2). Quant à l'année 805, elle ne compte pas dans les hivers rigoureux du IXe siècle qui furent 800, 821, 860 et 874. Il est de toute évidence que l'histoire de la congélation du Léman que raconte le Manuscrit de Prangins est absolument apocryphe.

Sauf cette légende que nous repoussons, la chronique ne mentionne aucun fait de congélation du Léman outre ceux que nous allons citer dans la rade de Genève. Et cependant les chroniques enregistrent avec beaucoup de soin la prise des lacs et rivières en Suisse, tellement que nous pouvons dresser un calendrier assez plausible des années de grande froidure.

Deux études que nous avons eu l'occasion de faire après les *grands hivers* de 1880 et 1891 nous ont fait connaître les allures de la congéla-

(1) Abrégé de l'histoire de Genève, depuis l'an 51 jusqu'en 1685. Copie d'un manuscrit qui a été trouvé au Château de Prangins, et présenté à la reine Clémentine femme de Louis II, roy de France (lisez la reine Clémence, femme de Louis X, 1315) (Bibl. F. Forel).

(2) « Le 1 octobre (!) 764, il fit un froid si violent que toutes les eaux gelèrent, tous les lacs de la Suisse et même la Mer Noire jusqu'à cent lieues d'Allemagne depuis son bord ». *Boyve*, Annales de Neuchâtel I 73 Berne 1854. — Jamais les lacs suisses, pas plus que la Mer Noire, n'ont gelé à la date du 1er octobre. F.-A.-F.

tion des lacs suisses [1] ; nous savons quel est l'ordre relatif de leur prise par la glace. D'abord les petits lacs des Alpes et du Jura, puis les petits lacs de la plaine ; puis les grands lacs peu profonds, Morat, Untersee, Zurich ; puis les grands lacs profonds qui gèlent très rarement, Neuchâtel, le Bodan et Annecy ; enfin ceux qui ne gèlent pour ainsi dire jamais, mais qui exceptionnellement sont saisis en tout ou en partie, Walenstadt, IV Cantons, Brienz, Thoune, le Léman, et le Bourget. Cette congélation n'arrive qu'en janvier ou février, au plus tôt en décembre (1879-1880).

L'on pourrait indiquer comme hivers rigoureux ceux dans lesquels les lacs de Zurich, de Morat et l'Untersee sont pris par la glace, et comme hivers très rigoureux ceux dans lesquels un ou plusieurs des lacs de Neuchâtel, de Constance, des IV Cantons, de Thoune ou d'Annecy sont gelés. Dans le tableau suivant, je ne donne que les hivers très rigoureux, en notant la congélation du lac qui m'autorise à cette attribution.

1276 (ou 77)	Bodan et tous les lacs suisses.
1379	Bodan.
1420	Neuchâtel.
1435	Bodan, Thoune,
1464	Bodan, etc.
1514	Neuchâtel, etc.
1571	Lario, Bodan, etc.
1573	Neuchâtel, Bodan, Annecy, IV Cantons.
1684	Bodan, Thoune.
1695	Bodan, Neuchâtel, Thoune.
1709	Bodan, Neuchâtel.
1789	Bodan, IV cantons.
1830	Tous les grands lacs.
1880	id.
1891 [2]	id.

[1] *F.-A. Forel.* La congélation des lacs suisses et savoyards pendant l'hiver de 1879-80. Echo des Alpes, XVI 94 et 149. Genève 1880. — La congélation des lacs suisses et savoyards dans l'hiver 1891. Arch. de Genève XXVII, 48. 1892.

[2] Dans ce tableau et les pages suivantes, je désigne l'hiver par l'année qui le termine. Ainsi l'hiver de 1891 est l'hiver de 1890 à 1891. Le froid est en général le plus rigoureux après le Nouvel-An ; puis ce qui nous intéresse ici, les lacs mettent un long temps à se refroidir et à arriver à la température de zéro où la congélation commence.

Dans aucun de ces hivers très rigoureux, le Léman n'est cité comme ayant été gelé, sauf les congélations littorales dont nous allons parler.

2° En effet, les chroniques rapportent la prise par la glace du port de Genève, de la rade de Genève, et la traversée du lac des Pâquis aux Eaux-Vives (1), et cela dans les années suivantes (2) :

En 1570, le lac gela tellement qu'on traversa sur la glace entre le Vangeron et Vésenaz.

En 1587, le 18 janvier, le Rhône a gelé vers la petite île ; de même une partie du lac.

En 1602 et 1603, gel du lac à Genève (3).

En 1681, 1er février, le lac fut gelé. On traverse sur la glace de Cologny à Sécheron (4).

En 1684, 1, 2 et 5 février, le lac gela à tel point que la glace reposant sur la terre, le Rhône fut arrêté, et qu'on traversait à pied sec depuis Cologny à Sécheron ; on fut obligé d'augmenter la garde du port, vu la facilité d'entrer dans la ville par le côté du lac.

En 1685, 5 janvier, le Rhône fut gelé depuis les Pâquis aux Eaux-Vives.

En 1697, 26 janvier, le Rhône fut entièrement gelé au-dessous des ponts et jusqu'à la pierre du Niton.

En 1709, 23 janvier. Il a fait ici depuis le 6 de ce mois un froid extraordinaire, à tel point que tous les moulins ont été arrêtés pendant quatre jours, et que le Rhône a gelé, ainsi que le lac, des Eaux-Vives aux Pâquis.

En 1785. Au commencement de mars, après un hiver très rigoureux en décembre et en février, on put traverser sur la glace des Pâquis aux Eaux-Vives (5).

(1) Faubourgs de Genève.

(2) Je dois les dates pour lesquelles je ne donne pas une indication spéciale à une communication de l'Ingénieur E. Merle d'Aubigné, d'après les Registres des Conseils de la République de Genève.

(3) M. S. N° 43 des Archives de la Ville de Genève. Communication de M. le prof. Eug. Ritter, à Genève.

(4) La congélation de 1681 est omise par Galiffe qui cite celle de 1670 (20 janvier, trois jours après le grand incendie du pont de l'Ile, le bras gauche du Rhône fut entièrement gelé), de 1684, 1685 et 1697. Genève historique, I., 34. 1869.

(5) Lettre de G.-A. Deluc du 10 juin 1785, communiquée par M. Edm. Pictet.

En 1788, 29 décembre. Le froid a été si rigoureux que le lac a gelé dans le port et sur les bords à une assez grande distance, et qu'on a pu traverser depuis l'un jusqu'à l'autre; il en a été de même du Rhône jusqu'au-dessous de la Ville, de manière que la machine hydraulique était arrêtée. Le lac fut gelé jusqu'à Sécheron. On passa à cheval et en traîneau des Pâquis aux Eaux-Vives.

1810. Dans la nuit du 21 au 22 février, le lac a gelé depuis le port jusqu'à 500m, à la suite d'une bise froide qui a soufflé plusieurs jours. Une accumulation de glaçons contre les digues qui barrent le Rhône en ont suspendu le cours et pendant quelques heures un bras du fleuve a été à sec (1).

1854, février. Bise violente les 13 et 14 février. Le 14, le Rhône est gelé jusqu'à l'estacade; le 15, la glace s'étend au-delà du port, depuis les Pâquis aux Eaux-Vives et dans la journée, des milliers de personnes ont traversé le Rhône sur la glace au-dessus de l'estacade. La débâcle a eu lieu dans la nuit du 15 au 16, malgré la persistance du froid, le thermomètre étant à —11°. Le 16 au matin la glace avait disparu (2).

1891, janvier. Le port et la rade ont été congelés et l'on a traversé d'une rive à l'autre (voir plus loin).

Les dates où la prise du port de Genève a coïncidé avec celles de la congélation des grands lacs sont les années 1570 (71), 1684, 1709, 1789 (88), 1891. En revanche, 1830 et 1880 qui ont été des *grands hivers* n'ont donné que des congélations partielles du port de Genève.

L'histoire nous apprend donc l'absence de congélation totale du Grand-lac, mais la congélation partielle du Petit-lac près de Genève.

Comment pouvons-nous concilier ce dernier fait avec les constatations modernes de la température pélagique du Grand-lac qui reste toujours au-dessus de 4.0°, avec nos affirmations que le Léman appartient au type des lacs tropicaux qui ne gèlent jamais? Nous allons pour le faire comprendre étudier d'abord le régime thermique littoral du lac en hiver.

(1) Bibl. britann. Sc. et Arts XLIII 198. 1810.

(2) Archives de Genève, XXV, 305. 1854.

2. *Régime thermique du littoral en hiver.*

Nous avons vu que la température moyenne de la région pélagique du Grand-lac est, dans les mois d'hiver, de 5° environ (janvier 5.9°, février 5.6°). Elle est descendue exceptionnellement en 1880 à 4.8°, en 1891 à 4.0°. Mais normalement elle ne s'abaisse pas au-dessous de 5°.

D'une autre part, j'ai dit que dans le fond des golfes et ports l'eau pouvait arriver à congélation, c'est-à-dire descendre à 0° ; nous verrons bientôt que ce cas se présente parfois dans toute l'étendue du Petit-lac qui se comporte alors comme un golfe du Grand-lac.

Nous pouvons donc avoir la juxtaposition dans le même lac à la surface, c'est-à-dire dans la même couche horizontale, d'eaux à 5° ou 5 $^1/_2$° dans la région pélagique, et d'eaux à 0° dans le fond des golfes. Ces eaux ont des densités sensiblement différentes. Comment un état statique peut-il exister dans de telles conditions ? Comment des courants ne mélangent-ils pas immédiatement ces eaux ?

Voici de quelle manière j'ai expliqué en 1880 ce fait curieux [1] :

Dans la région pélagique du plein lac, la température de l'eau étant au-dessus de 4°, nous y avons une stratification thermique directe, suivant la série :

Surface 5 $^1/_2$° — 5° — 4 $^1/_2$ — 4° *fond.*

Dans la région littorale, la surface étant au-dessous de 4°, la stratification thermique y est inverse, suivant la série :

Surface —0 —$^1/_2$° —1° —1 $^1/_2$° —2° —2 $^1/_2$° —3° —3 $^1/_2$° —4° *fond.*

Entre ces deux régions, à stratification thermique opposée, il y a une bande dans laquelle la surface étant de l'eau à 4°, l'eau à cette température étant le plus lourde possible, il ne peut y avoir au-dessous ni de l'eau plus chaude, ni de l'eau plus froide : toute l'épaisseur de l'eau doit être à 4°. Ce que j'exprime en continuant la même notation par :

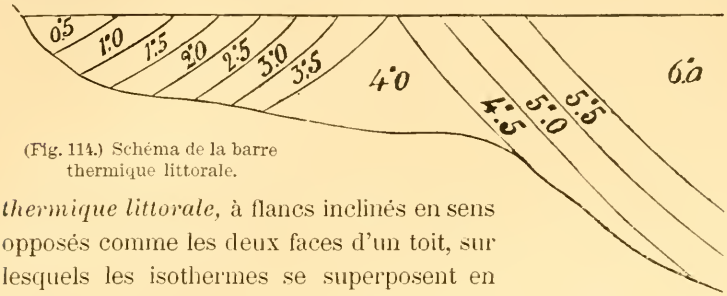
Surface 4° *fond.*

Nous avons donc la juxtaposition des stratifications suivantes :

Plein lac.	5 $^1/_2$	5	4 $^1/_2$	4	3	2	1	0	*Rivage.*
	5	4 $^1/_2$	4	4	4	3	2	1	
	4 $^1/_2$	4	4	4	4	4	3	2	
	4	4	4	4	4	4	4	3	
	4	4	4	4	4	4	4	4	

[1] [loc. cit. p. 373]

D'après cela, les isothermes doivent présenter la disposition de la figure 114 : il doit y avoir formation d'une barre d'eau à 4°, la *barre*



(Fig. 114.) Schéma de la barre thermique littorale.

thermique littorale, à flancs inclinés en sens opposés comme les deux faces d'un toit, sur lesquels les isothermes se superposent en stratification directe du côté du plein lac, en stratification inverse du côté de la rive. L'eau plus lourde de cette barre doit tendre sans cesse à s'écouler dans le fond ; mais, en descendant ainsi, elle doit permettre le contact des eaux plus chaudes et des eaux plus froides qui la limitent de chaque côté. Dans ce contact d'eaux de températures différentes, mais de densités égales, il doit y avoir mélange et production à nouveau d'eau à 4° : de l'eau à 3.5° se mélangeant avec de l'eau à 4.5° doit donner de l'eau à 4°. La barre littorale qui se détruit sans cesse par les courants descendants de convection doit sans cesse se reformer à nouveau par le mélange d'eaux de températures diverses.

Je puis donner une preuve directe de ce que je viens de décrire. Le 16 février 1880, à la fin du *grand hiver*, j'ai fait une série de sondages dans le Petit-lac, près de Nyon, alors que du côté de Genève les eaux étaient arrivées à la température de congélation. Voici les valeurs numériques de deux de ces sondages, opérés à moins d'un kilomètre de distance, l'un dans la région des eaux chaudes venant du Grand-lac, l'autre dans la région des eaux froides, du Petit-lac :

16 février 1880. Devant Nyon et Crans. Grand calme.

	Eau chaude	*Eau froide*
Surface 0m	4.3°	2.4°
10	4.3	3.1
20	4.3	3.5
30	4.2	3.9
40	4.1	4.0
50	4.0	4.0
60	4.0	4.0
75	4.0	—

Cette barre d'eau était très étroite ; la transition des eaux chaudes aux eaux froides était presque subite, et d'un bout du bateau à l'autre, je passais d'une région à l'autre. Voici les lectures thermométriques faites à la surface, de minute en minute, pendant que je faisais ramer aussi lentement que possible pour passer d'une région à l'autre :

$$2.4^{\circ} — 2.6^{\circ} — 3.0^{\circ} — 3.5^{\circ} — 4.6^{\circ}.$$

La barre thermique que j'ai ainsi constatée n'était pas le 16 février à la limite du Grand et du Petit-lac, à la barre d'Yvoire ; elle était repoussée à environ 5^{km} au S.-W., dans la direction de Genève, sur la ligne qui joint les villages de Crans et de Chens. (1)

La formation de cette barre thermique d'eau à 4° a pour conséquence la coexistence dans le même lac des deux régimes que j'ai attribués aux lacs tropicaux d'une part, représenté dans la région pélagique du Grand-lac, et aux lacs tempérés d'autre part, dans la région littorale et dans le Petit-lac, lequel, sous ce rapport, se comporte comme faisant partie du littoral.

Une autre conséquence est un élément extraordinaire de refroidissement des couches abyssales du Grand-lac : en voici le mécanisme. L'eau relativement lourde de la barre à 4° doit tendre à s'écouler par des courants de convection descendants au-dessous des eaux plus légères qu'elle. Du côté du rivage elle est bientôt arrêtée par le relèvement du sol ; mais du côté du plein lac, l'écoulement doit se faire d'autant plus facilement que l'inclinaison du fond y aide. L'eau de la barre à 4° doit donc descendre dans les grands fonds du lac et s'y accumuler en une couche plus ou moins épaisse au-dessous des eaux plus chaudes. Il doit y avoir, de ce fait, établissement d'une série de couches à stratification thermique directe, au-dessous de la grande masse d'eau plus chaude uniformisée par l'action de l'hiver.

Je crois avoir retrouvé cette couche dans un sondage thermométrique fait en plein lac le 13 mars 1880. Voici les chiffres, page 379, des couches inférieures du lac.

La masse générale du lac ne s'était pas refroidie au-dessous de 4.5° ; mais dans le fond j'ai trouvé une couche de 30^{m} d'épaisseur, dont la température était plus basse de un et même de deux dixièmes de degré.

(1) Ce refoulement de la barre thermique dans la direction de Genève doit être attribué à l'action du courant général du lac (voyez page 20).

195m	4.5°
240	4.5
260	4.5
280	4.4
305	4.3
310	4.3

Je l'attribue à l'eau de la barre littorale qui par suite de sa plus grande densité, s'était écoulée le long des talus jusque sur le plafond du lac.

Nous avons des faits analogues indiqués dans les sondages thermométriques

N° *40.*	25 mai	1886
41.	25 juin	—
44.	24 janvier	1891
48.	6 mars	—
51.	16 janvier	1892
52.	28 mars	—
53.	8 février	1894

Nous pouvons donc considérer comme bien constaté ce refroidissement accidentel des couches les plus profondes du lac.

Nous avons donc dans l'écoulement des eaux froides de la région littorale, en hiver, une cause puissante de refroidissement de la région abyssale à ajouter à celles que nous avons indiquées plus haut. Elle doit annuler en partie l'action de réchauffement qu'on doit attribuer à l'eau trouble des affluents ; elle doit abaisser la résultante et la ramener au chiffre de réchauffement de 1 à 3 dixièmes de degré par an que nous avons constaté. Si cette action n'intervenait pas, le réchauffement des couches profondes dû à la convection hydrostatique des eaux lourdes et chaudes des affluents relèverait puissamment la température des régions abyssales et celles-ci seraient beaucoup plus chaudes que nous ne le trouvons (v. p. 359).

La formation d'une barre thermique dans le Petit-lac n'est pas chose bien rare; presque chaque année nous trouvons dans la température de l'eau, mesurée dans le port de Genève, des cas où le thermomètre descend au-dessous de 4°. Cela a eu lieu dans les vingt dernières années aux dates que nous donnons dans le tableau de la page 380.

La date la plus hâtive a eu lieu le 8 décembre 1879, la plus tardive, le 17 mars 1887. Pendant ces 20 années, il n'y a eu que 5 années où le

1875	pendant	1 jour	1885	pendant	3 jours
76		5	86		20
77		0	87		14
78		3	88		42
79		1	89		7
1880		76	1890		5
81		0	91		61
82		0	92		21
83		0	93		32
84		0	94		10

cas de refroidissement littoral n'ait pas été constaté : la durée moyenne de ce refroidissement littoral est de 15 jours.

Pendant 15 jours, année moyenne, le Petit-lac est refroidi au-dessous de 4°; il présente la stratification thermique inverse; il est dans les conditions où la congélation peut survenir.

Nous allons constater que cette congélation a réellement lieu dans cette région du Petit-lac. Mais avant de décrire les faits qui le prouvent, je crois utile de préciser les phases et types que peut présenter la congélation des lacs.

3. *Phases et types de congélation.*

Dans la congélation d'un lac, on doit considérer trois phases : La phase de début, pendant laquelle les eaux de surface, refroidies à 0°, sont prises par la glace; la phase d'état ou de congélation définitive, dans laquelle la couche de glace solidement établie, résistant à la chaleur diurne, augmente d'épaisseur chaque nuit; enfin, la phase de dégel, dans laquelle la glace disparaît sous l'action de la chaleur. Etudions rapidement ces trois phases.

A. Phase de début, prise du lac.

Par suite du refroidissement automnal et hivernal, les eaux du lac sont descendues au-dessous de 4°. Ou bien le lac dans son ensemble, ou bien tout au moins sa région littorale, présentent la stratification inverse; la surface du lac peut descendre à 0°. Si la perte de chaleur

continue, il se forme dans l'eau des cristaux de glace; ces cristaux s'agglomèrent et se soudent, le lac se prend sous une couche de glace. La première congélation a lieu suivant deux types très différents.

Premier type. Congélation continue ou congélation lamellaire. — Si l'eau est calme, sur un lac en l'absence de vagues, la surface se prend en une nappe continue, parfois de fort grande étendue. Cette première prise a lieu ordinairement par une nuit sereine où la radiation est puissante, et où la surface de l'eau perd une énorme quantité de chaleur. Quelquefois la congélation se fait en une nuit sur tout un lac; le lac de Morat, le 17 décembre 1879, ne montrait pas trace de glace; le 18, au matin, une seule nappe glacée, sans solution ni rupture, couvrait toute l'étendue de ce lac de 27$^{km^2}$. (1)

Ce type de prise lamellaire se présente seul dans ce que nous appelons les congélations printanières. Ces deux mots jurent ensemble et cependant, je dois les accoupler. C'est au printemps, c'est après une belle journée de beau soleil que pendant la nuit un lac se couvre d'une mince lamelle de glace. Pour qu'il y ait prise de glace continue, il faut, en effet, deux conditions : que l'eau soit calme, sans cela nous aurions la formation de glaçons-gâteaux; que la perte de chaleur soit violente et rapide, sans cela la conduction disséminerait le froid dans les couches sous-jacentes et les cristaux de glace n'apparaîtraient pas. Or ces deux circonstances sont à la fois représentées dans le premier printemps, alors qu'une nuit sereine succède à une belle journée de grand calme; dans ces nuits sans nuage du printemps, si redoutées par les agriculteurs, alors que la vapeur d'eau atmosphérique est à son minimum, la plus grande partie ayant disparu dans les condensations successives de l'hiver, alors qu'elle joue mal son rôle d'écran protecteur, la diathermanéité de l'air est extrême et la radiation puissante. La surface du lac irradie une grande quantité de chaleur vers l'espace et se refroidit rapidement. C'est alors que sur un lac réjoui pendant la journée par les rayons du soleil printanier, l'on voit apparaître la nuit suivante une pellicule de glace de quelques millimètres d'épaisseur, qui forme d'immenses radeaux de centaines, de milliers de mètres de superficie. Nous trouverons sur le Léman des exemples de ces congélations lamellaires, de type printanier.

(1) [Loc. cit. p. 373.]

Si, dans la journée qui suit la prise en lamelles de glace de la surface du lac, la chaleur diurne ne suffit pas à fondre la glace, celle-ci augmentera d'épaisseur par sa face inférieure dans la nuit suivante, et la congélation définitive du lac sera établie.

Deuxième type. Coagulation discrète, formation *des glaçons-gâteaux* (1). — Si le lac est agité par des vagues, il se forme à sa surface un élément tout spécial de congélation que je désigne sous le nom de glaçon-gâteau (*pan cake* des Anglais); il est intéressant parce qu'il apparaît aussi sur la mer, si j'ai bien compris les descriptions des voyageurs polaires, et sur les fleuves qui charrient. Il mériterait donc d'être étudié plus attentivement. (2)

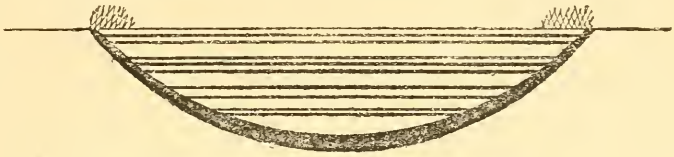
Les aiguilles de glace ballottées par les vagues s'agglomèrent en pains circulaires de quelques centimètres d'abord de diamètre, qui, s'entrechoquant réciproquement, restent séparés les uns des autres, et se développent chacun pour son compte, sans se souder à ses voisins. Chacun de ces pains se consolide bientôt en une masse de glace et forme un glaçon distinct. Par le heurt avec les glaçons voisins, les bords se brisent dans leurs parties saillantes à l'extérieur, et la forme circulaire se perfectionne. Les aiguilles de glace de nouvelle congélation et la poussière résultant du choc des gâteaux entr'eux, ces débris de glace nageant dans l'eau ambiante sont portés par les mouvements de l'eau sur les bords du glaçon et s'y établissent en un bourrelet de glace friable, légère, qui surmonte le disque et l'entoure d'une couronne blanche. Le bourrelet, s'élevant en l'air, pèse de tout son poids sur le glaçon flottant dans l'eau, et le fait enfoncer de quelque peu sous l'eau, tellement, qu'une couche liquide de faible épaisseur recouvre la face supérieure du radeau. Cette couche d'eau est mise en balancement par les mouvements des vagues, et venant frapper le bord interne du bourrelet, tend à le détruire ou à le repousser à l'extérieur, de telle

(1) Voyez Archives de Genève XXV, 352, 1891. — *F.-A. Forel.* La formation des glaçons-gâteaux. C. R. Acad. sc. Paris.

(2) La description provisoire que j'en donne se base sur mes souvenirs du charriage du Main, à Wurzbourg, dans les hivers de 1865 à 1867, et sur mes observations de 1891 à 1894, sur le Léman ; je n'ai malheureusement pas su trouver l'occasion d'aller, depuis que j'ai défini le type des gâteaux, revoir les glaçons d'un fleuve en grand charriage. J'ai vu des gâteaux sur le Léman, dans la rade de Genève, le 20 janvier 1891 ; dans le golfe de Morges en janvier 1891 ; dans le port de Morges, dans les hivers 1891, 1892, 1893 et 1894.

manière qu'à mesure que le gâteau s'accroît en diamètre, le bourrelet reste toujours marginal.

Le glaçon-gâteau s'accroît non seulement par sa face inférieure comme le fait la glace lamellaire de notre premier type de congélation, mais par toutes ses faces. Il s'accroît sur ses bords par formation de nouvelles aiguilles qui échappent au bris causé par les chocs avec les glaçons voisins ; il s'accroît sur sa face supérieure par congélation de la couche d'eau qui repose sur le glaçon à moitié submergé sous l'eau. Le gâteau s'accroît ainsi en épaisseur et en diamètre sous forme d'une lentille plan convexe, convexe par la face inférieure, plane sur la face supérieure, qui est surmontée par un bourrelet marginal (Fig. 115);



(Fig. 115.) Glaçon-gâteau. Coupe verticale.

il est constitué par une glace friable, spongieuse, de lamelles superposées, si j'en juge par les échantillons que j'ai pu étudier dans le port de Morges, dans les hivers de 1891-94. Il s'accroît en diamètre; j'en ai vu de un mètre et plus de diamètre en dehors du port de Genève le 20 janvier 1891.

Les glaçons-gâteaux continuent à se développer tant que l'eau est agitée et que le froid persiste ; s'il survient un instant de calme, ils se soudent ensemble et la congélation définitive survient.

B. Phase d'état. Congélation établie; congélation définitive.

Une fois la lame continue établie, que ce soit par congélation lamellaire, ou par congélation discrète en gâteaux qui se sont soudés, si le froid persiste, l'épaisseur de la glace s'accroît par apposition de nouvelles couches à la face inférieure de la lame.

L'épaississement, d'abord très rapide, n'augmente plus au bout d'un certain temps qu'avec une extrême lenteur. Il faut une très longue durée de grandes gelées pour amener la couche de glace à dépasser dans nos climats 30 ou 40 centimètres. C'est qu'en effet, pour qu'il y

ait épaississement de la glace, il faut qu'il y ait dégagement de chaleur dans l'air extérieur, propagation de la chaleur de bas en haut à travers toute l'épaisseur de la glace. Or, la conduction thermique est relativement lente dans la glace. On en jugera par l'observation suivante :

Le 26 janvier 1880, j'admirais sur le lac de Zurich recouvert d'une épaisse couche de glace de superbes mirages analogues à ceux de nos mirages d'hiver (voir plus loin). Il devait donc y avoir stratification thermique inverse de l'air, les couches les plus chaudes étant au contact de la glace. Je le vérifiai par quelques mesures thermométriques qui m'ont donné :

Température de l'air à		1.3m	au-dessus de la surface de la glace	—10.5°
—	—	0.01	—	— 8.0°
—	de la glace	0.01	au-dessous de la surface	— 3.8°
—	—	0.05	—	— 2.6°
—	—	0.10	—	— 0.8°
—	de l'eau du lac	0.13	—	+ 0.2°

On surprend dans ces chiffres le réchauffement de l'air par l'eau plus chaude du lac à travers la couche de glace, par conséquent la perte de chaleur par l'eau qui se transforme en glace. Le lac, même lorsqu'il est gelé, continue à réchauffer l'atmosphère. — Dans cette phase de congélation établie outre l'accroissement d'épaisseur de la glace (1) je n'ai à signaler, comme phénomène intéressant, que la formation de crevasses dues à la contraction des couches supérieures de la nappe glacée sous l'action du froid, ou à la distension des couches inférieures ; la glace doit s'enfoncer pour suivre le niveau du lac qui s'affaisse. Les crevasses qui sont signalées dans la plupart des observations de congélation des lacs mériteraient d'être étudiées méthodiquement ; le géologue y trouverait certainement plus d'une analogie intéressante. La formation des crevasses est accompagnée de détonations et de craquements qui intéressent vivement les témoins du phénomène, si j'en juge par les fréquentes citations dans les observations originales. Crevasses et détonations ne se présentent pas sur notre lac.

(1) Ceux que la question occupe trouveront dans mon étude sur la congélation des lacs suisses en 1891 [loc. cit. p. 373] des mesures intéressantes sur l'accroissement d'épaisseur de la glace, entre autres dans les lacs de Morat, d'Alpnach, de Sarnen, de Lungern, de Sempach, de Baldegg, de Halwyll, de Zoug.

C. Phase de dégel.

La température de l'air s'élevant au-dessus de zéro, la chaleur attaque la glace et la liquéfie par la face supérieure; la lame glacée, ne perdant plus de chaleur par sa face supérieure, est fondue par l'eau sous-jacente qui est plus chaude que zéro. La chaleur rayonnée par le soleil traverse la glace et réchauffe parfois beaucoup cette eau sous-jacente (1). La glace diminue d'épaisseur, devient humide, se ramollit ; elle se brise en glaçons irréguliers, et ceux-ci disparaissent plus ou moins rapidement. Sitôt que quelques flaques d'eau sont devenues libres, l'action du vent qui mélange les couches de l'eau en annulant la stratification inverse amène le réchauffement des couches supérieures du lac, et débarrasse celui-ci de ses glaces avec une promptitude souvent surprenante.

Dans cette phase apparait un phénomène intéressant : c'est le changement de structure de la glace. La masse, en apparence compacte et continue dans la phase d'état, se divise pendant la phase de dégel en colonnes prismatiques verticales de 1 à 3^{cm} de diamètre. Ces prismes irréguliers, à 3, 4, 5 ou 6 pans, semblables dans leur irrégularité à des colonnes de basalte, deviennent visibles lorsqu'on laisse fondre au soleil un bloc de glace enlevé au lac, et lorsqu'on le brise d'un coup brusque. Cette formation apparait sur toute vieille glace du lac, suffisamment épaisse ; elle est due probablement à la rétraction des couches supérieures de la glace sous l'influence du froid qui les pénètre

(1) La diathermanéité de la glace est prouvée par l'expérience suivante :

Du 8 janvier 1871. Soleil brillant, température de l'air + 1.4°. J'ai fixé la boule d'un thermomètre à mercure dans un tube de verre de 1^{cm} de diamètre, rempli de cire noircie par de la poussière de charbon. Je l'ai refroidi à 0°. Puis je l'ai placé au centre d'un trou cylindrique de 2^{cm} de diamètre, foré au travers d'un bloc de glace de rivière, et obturé aux deux extrémités par un bouchon de neige. Le thermomètre à chemise de cire dans un bain d'air recevait directement les rayons solaires qui lui arrivaient à travers une paroi de glace de 2^{cm} environ. Je fis sur le thermomètre les lectures suivantes :

10^h 10^{min}	0.0°	10^h 47^{min}	15.1°
— 22	9.4	— 52	15.5
— 33	12.4	— 56	16.0
— 37	13.5	11 01	16.4
— 42	14.2	— 09	16.8

A la fin de l'expérience la paroi de glace avait encore un centimètre d'épaisseur. Ainsi donc le thermomètre entouré de toutes parts de glace avait élevé sa température à 16.8° par l'effet de la chaleur solaire ; la diathermanéité de la glace est considérable.

d'autant plus que l'épaisseur de la glace est plus grande, tandis que les couches profondes en contact avec l'eau à 0° gardent une température relativement plus élevée.

Une telle division de la glace en prismes verticaux diminue notablement la résistance à la pression de la nappe solide. Dans l'hiver de 1891, sur le lac de Zoug, M. Bieler a constaté que la glace, qui en phase de congélation progressive portait déjà l'homme avec une épaisseur de 11cm, était devenue dangereuse lorsqu'en phase de dégel elle avait encore 22.5cm (1). Les instructions du ministère de la guerre de France qui disent que la glace de rivière, à une épaisseur de 4cm, commence à supporter le poids d'un homme, à une épaisseur de 9cm porte un détachement d'infanterie, à 12cm porte des pièces d'artillerie de huit, etc., ne s'appliquent qu'à la jeune glace en phase de congélation progressive ; il serait dangereux de s'y fier sur de la vieille glace, divisée par le procès que j'indique en prismes verticaux. (2)

Les phases de congélation établie et de dégel ne se développent sur le Léman que dans certains points limités, plus ou moins séparés de la grande masse du lac, tels que les lagunes (de Villeneuve ou des Pierrettes), les estuaires (de la Venoge ou de l'Aubonne), les ports fermés (de Morges ou de Genève), les fonds de golfes, et cela seulement dans les hivers rigoureux. Je n'ai pas d'observations spéciales à citer de ces phénomènes et je me borne, à leur égard, à renvoyer aux faits généraux dont je viens de faire la théorie.

Il en est autrement de la phase de début ou de prise de la glace qui présente sur notre lac plusieurs traits instructifs ou intéressants. Je vais donc décrire ou raconter :

La congélation de la rade de Genève par coagulation discrète, telle qu'elle a été étudiée, entre autres, en 1891.

La congélation lamellaire, congélation printanière du Petit-lac en 1880, 1888 et 1891.

La congélation lamellaire du Haut-lac en 1891.

4. *Congélation de la rade de Genève.*

Le port de Genève a souvent été pris par la glace ; nous avons indiqué p. 374 les dates assez nombreuses dans lesquelles on cite cette

(1) Voir Congélation des lacs suisses en 1891 [loc. cit. p. 373.]

(2) Revue scientifique de Paris, LI, 379, 1893.

apparition. Mais le phénomène complet, celui qui cause une grande émotion dans la population genevoise, qui est constaté par les chroniques, c'est la congélation totale de la rade amenée au point où l'on peut se hasarder à traverser d'une rive à l'autre. Nous l'avons vu en 1891 : l'événement était si inattendu, si rare, si intéressant que chacun a voulu en être témoin : hommes et femmes, enfants et vieillards, tous ont voulu traverser le lac à pied sec ; oui, jusqu'à des infirmes qui se sont fait porter à travers le lac. Plus encore que la congélation totale du lac de Zurich, qui est une fête pour le nord-est de la Suisse, la traversée de la rade de Genève est un fait tellement extraordinaire qu'il est enregistré avec soin dans la chronique. C'est une date météorologique certaine, et par conséquent, semble-t-il, de grande valeur historique.

La traversée sur la glace de la rade de Genève a eu lieu en 1570, 1681, 1684, 1785, 1788 (le 29 décembre, par conséquent dans l'hiver de 1789, si nous désignons l'hiver par l'année dans laquelle il se termine), 1810, 1854 et 1891. Nous allons résumer les circonstances principales de la congélation de 1891, et nous en tirerons quelques notions générales intéressantes.

A partir du 1er janvier 1891 [1], la température de l'eau mesurée dans le port de Genève était au-dessous de 4° ; l'eau du Petit-lac était donc froide ; la stratification thermique était inverse, et la congélation devenait possible. Dès le 9 janvier, le port montrait des prises partielles par la glace. Le 17, une forte bise s'élève, et en dehors du port le lac se coagule en glaçons-gâteaux de plus en plus grands : ce jour-là déjà, le port est entièrement pris et l'on peut traverser du quai des Eaux-Vives au quai du Mont-Blanc, d'une rive à l'autre. La bise continue le 18 et le 19 ; la rade de Genève se couvre d'énormes glaçons-gâteaux qui forment un caillebotis de plus en plus large, lequel s'avance toujours plus dans le lac. Les gâteaux se soudent le long des jetées, et le 19 toute la rade est prise en une nappe assez continue pour que l'on ose la traverser en dehors des jetées. Le 20, la bise tombe, et quoique le froid continue avec grande intensité, immédiatement la glace fond sur le cours du Rhône, au milieu de la rade, entre les jetées et dans le port. Le 21 janvier, la glace diminue rapidement ; le 22 elle avait disparu.

On a remarqué que la glace avait commencé à fondre aussitôt que

[1] Il y avait déjà eu apparition passagère d'eaux froides le 29 décembre 1890.

la bise avait cessé de souffler, alors même que la température de l'air ne s'était pas sensiblement adoucie (1). Semblable observation ayant été faite plusieurs fois dans des circonstances analogues (2), elle demande une explication. La voici : (3)

Quand le lac est calme, par une température très basse de l'air, le Petit-lac se refroidit au-dessous de 4° et il s'y développe la stratification thermique inverse; les couches superficielles descendent à zéro, les couches profondes restent à 4°. Mais cette stratification est détruite à l'intérieur du port de Genève par l'action du courant du Rhône dont les tourbillons et les remous amènent le mélange de l'eau. Couches supérieures et couches profondes donnent une température moyenne de + 1° à + 3°, suivant les circonstances ; il ne se produit aucune glace dans le port, dans la partie traversée par le courant du fleuve tout au moins. C'est ce qui est prouvé par les mesures thermométriques de M. A. Kammermann, du 30 janvier 1891 (v. p. 329). En dehors du port, stratification inverse très marquée : dans le port, température uniforme, moyenne, plus chaude par conséquent que la température de surface extérieure au port.

Mais, lorsque la bise souffle, les conditions sont fort différentes. Les couches de surface, refroidies à zéro par leur contact avec un air très froid, sont chassées du côté de Genève par les courants de convection mécanique ; elles s'y accumulent, et la couche froide peut acquérir une grande hauteur ; au lieu d'être une lame mince, sans épaisseur, elle peut descendre jusqu'à 10, jusqu'à 20m et plus (4). Dans ce cas l'eau qui s'écoule sur le banc du Travers et qui forme le courant du

(1) D'après l'Observatoire de Genève, la moyenne de la température de l'air a été :

17	janvier	—10.3°	Vent variable	
18	—	—11.5	N N E	3
19	—	—11.9	N N E	2
20	—	—10.9	N E	1
21	—	— 6.6	S E	1
22	—	— 0.3	W	1

(2) En 1810, la congélation du port de Genève est survenue à la suite d'une bise froide qui a soufflé pendant plusieurs jours. En 1854, bise violente qui amène le gel de la rade ; fonte de la glace coïncidant avec la cessation de la bise, malgré la persistance du froid. Voir ci-dessus p. 375.

(3) Arch. de Genève, XXV, 597, 1891.

(4) Voyez ci-dessus les observations thermométriques de M. Th. Turrettini et de M. van Berchem (p. 366 sq.).

Rhône est prise toute entière dans cette couche froide, et le mélange des eaux par les remous du fleuve ne procure aucun réchauffement de l'eau ; l'eau y reste à zéro, puisque toutes les couches qui participent à ce mélange sont à zéro. Il peut y avoir alors, dans le port, formation d'aiguilles de glace, de glaçons-gâteaux, et congélation du port de Genève aussi longtemps que la bise soufflera. La cessation de la bise rétablira l'état normal, la stratification thermique accentuée en dehors du port, l'arrivée dans le Rhône des couches moyennes plus chaudes, par conséquent le mélange des eaux qui aboutit au réchauffement à + 1 à + 3° de l'eau du port, par conséquent la fusion de la glace.

De cette analyse des faits, je tirerai comme probables les conclusions suivantes :

1° Il y a possibilité de congélation de la rade de Genève sitôt que le Petit-lac, descendant au-dessous de 4°, prend la stratification thermique inverse. Ce cas n'est pas rare. Nous avons vu qu'il s'est produit pendant 15 hivers sur les 20 dernières années, et, en moyenne, pendant 15 jours par hiver.

2° Pour qu'il y ait congélation totale et traversée possible de la rade de Genève, il est nécessaire que le vent du nord ait soufflé avec force et persistance pendant quelques jours. Il faut donc qu'il y ait coïncidence entre un grand froid et une bise forte et soutenue. Si la bise manque, un très grand froid peut ne pas amener la congélation totale de la rade de Genève.

3° Par conséquent, si les dates connues de la congélation totale et de la traversée sur la glace de la rade de Genève sont bien celles de grands hivers, l'absence de ces apparitions n'est pas une preuve décisive contre l'existence d'un grand froid. Si, en 1830 et 1880, on n'a pas traversé la rade de Genève, il ne s'en suit pas que ces deux années n'aient pas eu de grands hivers.

4° Les documents historiques qui témoignent de la traversée sur glace de la rade de Genève ont donc une valeur positive pour l'histoire météorologique du pays. Leur absence n'a pas de valeur négative assurée.

5. *Congélation printanière de la région pélagique du Petit-lac.*

A la fin du grand hiver de 1880, on nous a signalé des faits curieux qui n'avaient jamais été observés auparavant, ou qui du moins

n'avaient jamais été relatés par personne : l'apparition de radeaux de glace lamellaire au large, dans le Petit-lac. Voici le résumé des observations :

1° Le 9 février 1880, à 7^h, le bateau à vapeur le *Simplon*, dans sa traversée de Nyon à Tougues, a rencontré en plein lac de larges radeaux d'une glace transparente et cassante, de 2 à 3^{mm} d'épaisseur ; ces champs de glace, qui s'étendaient parfois à perte de vue, étaient interrompus par places, et l'eau libre était ridée par une brise légère. Le bateau brisait facilement la glace fragile, et les glaçons chevauchaient les uns sur les autres (rapport de M. Nodot, capitaine du *Simplon*).

Le lendemain, 10 février, un matelot du vapeur le *Jura* a vu, près de la Belotte, une nappe de glace analogue à celles de la veille, qui, partant de la rive, s'avançait jusqu'à l'eau bleue.

2° Le 14 février, la congélation a repris de nouveau. Voici un extrait du rapport de M. Provost, capitaine du *Jura*, qui décrit fort bien le phénomène : « A 7^h10 du matin, dans la traversée de Nyon à Tougues, dix minutes après le départ de Nyon, j'ai passé dans un champ de glace de 400^m de largeur ; l'épaisseur de la glace était de 2 à 3^{mm}. Du bord de la banquise au port de Tougues, j'ai compté 4 minutes. » (Le *Jura* marchant avec une vitesse moyenne de 320^m à la minute, cela représente une distance de 1300^m). « Du côté du N.-E., la nappe de glace ne remontait pas fort loin, mais elle s'étendait à perte de vue dans la direction de Coppet. De Tougues à Hermance, il n'y avait pas de glace près de terre, mais au large, à 500^m environ, je voyais de grands champs de glace qui s'étendaient du S.-O. au N.-E. D'Hermance à Anières, nous avons passé tout près de la glace, sans la toucher ; mais d'Anières à Corsier et à Bellerive, nous sommes entrés en plein dans la glace que nous avons déchirée à grand fracas ; j'en estime l'épaisseur à $4\text{-}5^{mm}$. De Bellerive à la Belotte, et jusqu'à Cologny, même nappe de glace, peut-être un peu plus épaisse ; de Cologny à Genève, mer libre. »

Le 15 février, au matin, la glace était fort épaisse de Bellerive à Cologny, elle gênait presque la marche du vapeur le *Simplon*. Des glaçons pêchés au filet, et mesurés sur le bateau, avaient une épaisseur de $5\text{-}13^{mm}$. La glace était aussi fort étendue sur la rive droite, de Bellevue à Coppet. Ces champs de glace ont été vus pendant toute la journée par des bateaux de promenade ou

de chasse; ils étaient assez solides pour porter des bandes de canards sauvages qui s'y reposaient; à 4 et 5h du soir ils avaient résisté aux rayons d'un splendide soleil de printemps.

Le 16 février, au matin, la glace s'étendait de Corsier à Cologny; elle était fort épaisse par le travers de la Belotte et mesurait au moins 1cm d'après l'estimation du capitaine du *Jura*. On reconnaissait les glaçons brisés la veille par le passage des bateaux à vapeur, glaçons qui n'avaient pas fondu pendant la journée, et s'étaient soudés de nouveau pendant la nuit. Ce même jour, le capitaine du *Guillaume-Tell* a mesuré des glaçons qui avaient jusqu'à 14mm d'épaisseur. Dans la soirée, sous l'action du vent sudois, l'air est devenu chaud et humide, et la glace a disparu.

3° Le lac a de nouveau été pris le 1er mars, au matin. « Dans ma course d'Yvoire à Genève », dit le rapport du capitaine du *Jura*, « ce matin, j'ai rencontré de la glace à partir de la pointe de Bellerive : une nappe longue de 500m, large de 100m, à 400m de la terre; venait ensuite un intervalle d'eau libre de 400m, puis de nouveau une glace plus épaisse et plus étendue. En approchant de la Belotte, la glace venait jusqu'à terre, et s'étendait à perte de vue dans la direction de Genthod. Elle avait en cet endroit une épaisseur de 5 à 7mm. Une vingtaine de mouettes se promenaient gravement sur ce radeau poli et transparent. De Cologny à Genève, eau libre. »

Ce fut le dernier épisode de la congélation du Léman en 1880.

Cette formation de radeaux de glace à la surface du Petit-lac est intéressante à plus d'un point de vue.

a. C'en est le premier exemple connu dans notre lac. Jamais, jusqu'à cette apparition, le phénomène n'avait été décrit. Cependant, comme nous allons le dire, le phénomène n'est pas très rare; il s'est reproduit plusieurs fois depuis lors.

b. La possibilité d'une congélation superficielle du Petit-lac résultait de l'état thermique de cette partie du Léman. Depuis le 8 décembre 1879, le Petit-lac avait des eaux froides, ce qui est prouvé par les observations de température du port de Genève qui indiquaient constamment des chiffres au-dessous de 4°; les eaux étaient en état de stratification inverse.

c. Le moment où le phénomène a eu lieu est intéressant par son

époque tardive; la plupart des lacs suisses ont été gelés en décembre et en janvier. Le Léman n'a commencé à se prendre qu'en février, alors que plusieurs d'entre eux (Annecy, Quatre-Cantons) étaient déjà en dégel; il a eu encore une congélation le 1er mars, alors que les lacs de Neuchâtel, de Zurich, de Zoug, de Constance étaient libérés de glaces. Voici du reste pour permettre une comparaison utile avec les autres lacs, les époques de leur congélation dans l'hiver 1880:

Morat	du 18 décembre	au 8 mars
Bienne	22 —	5 —
Neuchâtel	20 —	24 décembre
—	8 février	18 février
Zurich	28 décembre	29 décembre
—	22 janvier	29 février
Zoug	24 —	. . . . .
Constance	2 février	20 février
IV Cantons	6 —	10 —
Annecy	20 janvier	10 —
Léman	9 février	10 —
—	14 —	16 —
—	1 mars	1 mars

Pourquoi la congélation du Léman n'a-t-elle pas commencé en décembre, alors qu'ont eu lieu les grands froids de l'hiver? Le Petit-lac était, dès le 8 décembre, dans les conditions telles que la congélation était possible. — Etudions de plus près l'état météorologique des journées et des nuits où a eu lieu la congélation du lac. Voici, d'après l'Observatoire de Genève, le minimum thermométrique et le maximum de la journée:

	Minimum	Maximum		
8 février	. . .	+ 2.3°		
9 —	— 1.5°	+ 4.0	Gel du lac.	
10 —	+ 0.5	+ 2.2	—	
13 février	. . .	+11.4		
14 —	— 4.2°	+ 4.0	Gel du lac.	Gelée blanche.
15 —	— 3.5	+ 4.6	—	—
16 —	— 2.3	+ 5.2	—	—
29 février	. . .	+ 8.5°		
1 mars	— 1.7°	+12.9	Gel du lac.	Gelée blanche.

D'après ces chiffres, la congélation du lac n'a pas eu lieu par des journées de grand froid : pendant le jour, la veille aussi bien que le jour même des apparitions de glaces, le thermomètre était toujours au-dessus de zéro, et cela de valeurs importantes allant jusqu'à 5, 10 et 12° ; pendant la nuit, le thermomètre descendait au-dessous de zéro, mais pas beaucoup, au plus à — 4.2°. C'était là un état thermique de l'air bien moins grave que celui dont nous avions souffert en décembre et en janvier. En décembre, le thermomètre est resté à Morges pendant 24 jours au-dessous de zéro, du 5 au 29 ; la moyenne de décembre de l'Observatoire de Genève a été de — 6.9° ; le minimum thermométrique a été pendant 13 jours au-dessous de — 10°. Janvier a été moins rude, mais encore très froid ; 3 jours avec une température minimale inférieure à — 10°.

Cela étant, je décomposerai le problème en deux questions

Pourquoi le lac n'a-t-il pas gelé pendant les mois de décembre et de janvier ? — J'attribue le fait à ce qu'il a régné presque constamment des vents plus ou moins forts, dont les vagues agitaient l'eau, mêlaient les couches superficielles avec les couches profondes plus chaudes, et empêchaient ainsi la prise par la glace. Cet état d'agitation de l'air est indiqué par les observations météorologiques de Genève qui n'ont noté le calme de l'air (désigné par le mot variable) que pendant trois jours du mois de décembre très froid (moyenne — 6.9°), et pendant 10 jours du mois de janvier beaucoup moins froid (moyenne — 3.7°).

Pourquoi le lac a-t-il gelé en février et mars ? C'est que dans les nuits où il s'est laissé prendre, il régnait un calme plat, absence de vents qui auraient mélangé les couches de l'eau (14 jours variables à Genève dans le mois de février). Puis et surtout, que dans ces nuits le ciel parfaitement serein permettait un rayonnement puissant. L'eau [1], comme tous les corps athermanes [2], c'est-à-dire peu transparents pour la chaleur, rayonne elle-même puissamment. On le savait déjà auparavant. On connaît l'exemple classique de la production artificielle de la glace au Bengale : on expose, dans la soirée, de l'eau renfermée dans des bassins plats, peu profonds, reposant sur des corps mauvais conducteurs ; le rayonnement des belles nuits claires est tel,

[1] L'eau n'est athermane que pour la chaleur obscure ; elle laisse fort bien passer la chaleur lumineuse ; mais, dans le cas de rayonnement nocturne, nous n'avons affaire qu'à la chaleur obscure.

[2] Il serait plus logique de dire *adiathermane ;* mais les auteurs, à la suite de Melloni, ont adopté le mot *athermane.*

qu'il y a formation de glace à la surface de l'eau, quoique le thermomètre ne descende souvent pas au-dessous de + 10°. C'est un fait analogue que nous avons eu sur le Léman en février 1880. Par ces splendides nuits de limpidité absolue, sous une atmosphère très pauvre en vapeur d'eau, le rayonnement était énorme, la surface de l'eau perdait une grande quantité de chaleur et les radeaux de glace se formaient sur le lac.

Une telle apparition est du reste plus fréquente que l'on ne le supposait. Depuis que j'ai attiré l'attention sur ce phénomène, j'ai reçu une foule d'observations analogues des lacs de Bienne, de Morat, de Constance, de Zurich, etc., qui, toutes, signalent à la fin de l'hiver et au premier printemps la production de radeaux temporaires de glace, apparaissant sur le lac après les nuits claires et calmes, et disparaissant sous la chaleur de midi.

J'en citerai un cas qui m'a beaucoup frappé. Le 15 mars 1886, j'avais été invité par la Commission genevoise d'études de la transparence de l'eau à assister aux expériences faites en plein lac, à bord de la *Ville de Genève*. Nous avions passé toute la soirée sur le lac, une splendide soirée de beau printemps pendant laquelle, quoique travaillant en plein air, nous n'avions pas pensé à souffrir du froid. Lorsqu'à 1 heure du matin le bateau me ramena à Morges, je vis la surface du port recouverte d'une mince couche de glace lamellaire. La nuit n'avait certes pas été glaciale ; le thermomètre à minimum de l'Observatoire de Lausanne (Asile des aveugles) n'était pas descendu au-dessous de — 2.5°, et, cependant, le port de Morges s'était congelé. C'était un cas de congélation nocturne printanière parfaitement caractérisée.

Depuis les observations de février 1880, les congélations pélagiques du Petit-lac, sous forme de radeaux lamellaires apparaissant en plein lac, ont été constatées à plusieurs reprises. On m'a communiqué les cas suivants :

3 mars 1888. Cologny, Port-noir. M. Milleret, capitaine du *Dauphin*.

29 et 30 janvier, 22, 23 et 24 février 1891. Dans la partie méridionale du Petit-lac. Rapports des capitaines de bateaux à vapeur.

1er mars 1891. De Cologny à la Pointe de la Bise. M. A. Doret, à Genève.

1er avril 1891. En dehors de la jetée des Eaux-Vives. M. F. Reverdin, à Genève.

19 février 1893. De Montalègre à Bellerive. M. A. Doret.

Le phénomène n'est donc pas aussi rare que nous l'avions cru d'abord. S'il n'a pas été signalé avant 1880, c'est probablement parce qu'autrefois le lac était moins parcouru en hiver qu'il ne l'est actuellement. Peut-être aussi n'y avait-on pas fait attention, ou n'avait-on pas cru devoir en avertir les naturalistes.

6. *Congélation du Haut-lac en 1891.*

Un fait, sans précédents connus, ni dans l'histoire ni dans la tradition, s'est présenté en février 1891 : la congélation partielle, locale, congélation printanière de la nappe du Grand-lac.

C'est dans le golfe de Territet à Montreux que l'apparition a surtout été bien développée. D'après les observations de MM. H. Schardt et C. Bührer, voici la marche du phénomène : Le 17 février, au matin premiers glaçons entre l'hôtel Breuer et le Trait, dans le golfe de Territet ; ils disparaissent dans la journée. Les jours suivants, la formation de glace est mieux marquée. Le 20, la glace s'étend dans le golfe de Bon-port à Territet sur plus de 400m de largeur. La glace, quoique brisée par les bateaux à vapeur, persiste jusqu'au soir. Le 21, la glace envahit le golfe de Clarens ; au soir, il en apparaît entre Chillon et Villeneuve. Le 23, on évalua sa largeur à 1000m ; des radeaux de glace non soudés au rivage dérivent au large ; le 25, nappe de glace presque continue de Montreux au Bouveret. Les jours suivants, affaiblissement de l'apparition qui cesse entièrement le 1er mars.

La glace mesurait au plus 1cm d'épaisseur ; elle fondait ordinairement pendant la journée, mais se reformait pendant la nuit. C'était par un temps de calme plat : pendant le jour, la température de l'air s'élevait à quelques degrés au-dessus de zéro ; pendant la nuit, elle descendait à — 3°, à — 4°. Mais, si le soleil brillait pendant le jour, la nuit aussi était admirablement sereine ; il y avait une puissante radiation. C'était un cas de congélation printanière.

Ce n'est pas seulement dans les golfes de Montreux que le phénomène a été observé. On l'a signalé le 22 février dans le golfe de Vevey, le 24 février dans la Grande Conche, entre Thonon et Yvoire, le 26 février en dehors du port de Morges, le 28 février devant Glérolle,

entre Rivaz et St-Saphorin, le 1er mars devant Lutry. Mais, sauf dans le golfe de Territet où elle persistait en partie pendant la journée, la glace n'avait qu'une très faible épaisseur, quelques millimètres à peine, et fondait aux premiers rayons du soleil.

Quel était alors l'état thermique du Léman? Les sondages thermométriques nous l'apprennent. Le 21 février, au large d'Ouchy, la surface de l'eau était à 4.4°, et jusqu'à 150m de profondeur je trouvais 4.1° (sondage n° 45). Le 23 février, soit au Bouveret, soit à Vevey, je trouvais encore 4.2 à 4.1° à la surface (sondages nos 46 et 47). Dans les couches profondes, le thermomètre descendait à 4°. Il y avait donc en plein lac la stratification thermique directe. Mais les radeaux de glace qui se formaient près du rivage y indiquaient la stratification inverse. Il y avait donc sur tout le pourtour du Grand-lac, à Thonon, à Morges, à Lutry, comme à Montreux, établissement de la barre thermique littorale que nous avons décrite p. 376. Il y a donc possibilité de juxtaposition des deux stratifications directe et inverse, non seulement dans un golfe étroit et resserré comme le Petit-lac, mais sur des côtes largement ouvertes vers le plein-lac. Combien doivent être lents et paresseux les courants de convection thermique qui tendent à égaliser la température dans les couches horizontales du lac, pour qu'une telle juxtaposition puisse se produire dans de telles conditions!

La juxtaposition des deux états thermiques dans l'étendue du Grand-lac est prouvée par des mesures de température superficielle que j'ai faites le 23 février, dans l'après-midi, à l'époque des plus belles congélations du golfe de Montreux :

Golfes de Morges, des Pierrettes, de Pully, de Cully et de Corsier,	4.1 à 4.3°
Devant la Tour-de-Peilz	4.0
Pointe de Clarens	3.8
Golfe de Montreux	3.6
Golfe de Territet, au bord de la glace	1.6
Devant Chillon	3.6
Golfe de Villeneuve	3.8
Devant le vieux Rhône, et golfe du Bouveret	4.0

D'après ces mesures et ces sondages, tandis que les eaux littorales du Haut-lac étaient froides, la masse pélagique principale du Grand-lac était encore de l'eau chaude, et même au moment de ces intéres-

santes congélations printanières de Montreux, le Léman n'est pas, dans sa partie centrale, arrivé à l'état de congélation possible (il n'en était pas bien loin). Le Léman appartient donc bien, jusqu'à nouveaux faits, à la classe de nos lacs de type tropical qui ne gèlent jamais.

7. *Glaçons de neige tenant sur l'eau du lac.*

Un phénomène, probablement assez fréquent sur d'autres eaux, mais très rare sur le Léman, a été observé les 14 et 15 février 1888 : c'est la *prise* de la neige sur l'eau [1]. Une abondante chute de neige verse sur l'eau froide des flocons sans cesse renouvelés; les premiers cristaux de neige se mouillent, absorbent de la chaleur latente en se transformant en eau, refroidissent ainsi le liquide dans laquelle ils baignent, amènent la couche superficielle de l'eau à zéro degré, et ralentissent assez la fusion de leurs successeurs pour que ceux-ci persistent à l'état de glace jusqu'après la chute de nouveaux flocons. Il se forme bientôt à la surface de l'eau une crème blanchâtre de neige mouillée : de larges plaques, glaçons inconsistants, mous, flexibles, accumulés en certains points par le jeu des vagues et des courants, recouvrent l'eau d'une couche plus ou moins continue. Un corps solide la traverse sans difficulté en laissant un trou.

Pour que l'apparition puisse se produire, il faut :

a) Que l'eau soit froide, près de 0° ou tout au moins au-dessous de 4° : nous reviendrons sur ce point ;

b) Que la chute de neige soit considérable et pressée :

c) Que l'eau soit au calme plat.

Ces conditions étaient représentées sur le lac Léman, quand le 14 février, vers 9 heures du matin, une violente chute de neige a fait blanchir toute notre vallée. Dès 4 heures du soir, j'ai vu le port de Morges couvert des *glaçons de neige* que je viens de décrire : ils ont persisté jusqu'au lendemain matin. Le même phénomène a été vu : dans les ports fermés de Morges, la Tour-de-Peilz, Genève, Ouchy (nouveau port) ; dans les ports largement ouverts du Bouveret, d'Ouchy (vieux port), de Rolle ; au fond des deux golfes de Morges (golfe des Roseaux et golfe du Parc) : enfin, ce qui est plus étrange encore, en plein lac, de la Belotte à Tougues et à Yvoire, le long de la

[1] Bull. S. V. S. N., XXIV, p. 77, 1889.

rive, et jusqu'à 100 ou 200m en avant, au-delà du mont, à ce que m'ont affirmé les capitaines et pilotes des bateaux à vapeur le *Jura* et l'*Aigle*.

Semblable apparition s'est reproduite sur le port de Morges le 21 février 1888.

On avait déjà observé un fait analogue le 10 février 1880, dans le Petit-lac, entre Genthod, la Belotte et Genève. « Le lac était tout blanc de neige : les flocons de neige tombant dans une eau à température de glace ne s'y fondaient pas et formaient une crème, une bouillie blanche, opaque, dans laquelle le bateau à vapeur s'avançait sans bruit et sans craquements » (rapports des capitaines du *Simplon* et du *Guillaume-Tell*). Un radeleur d'Hermance a vu le même phénomène ce jour-là.

Les apparitions de glaçons de neige du 10 février 1880 et du 21 février 1888 sont assez normales. Ces jours-là l'eau du Petit-lac, près de Genève, et celle du port de Morges étaient très refroidies par la température basse des jours précédents ; elle était au-dessous de 4°, et la stratification inverse de l'eau, au-dessous du maximum de densité, était régulière. Le 21 février 1888, j'ai mesuré dans le port de Morges :

Surface		0.0°
à 0.6m de profondeur		+ 2.3
1	—	+ 2.6
2	—	+ 2.8

Mais le 14 février 1888, il en était tout autrement. Le 7 février, la température profonde du Grand-lac, mesurée par moi-même devant Morges, à 120m de profondeur, était 5.0° : la température superficielle 5.2°. Jusqu'au 13 février, le temps a été relativement doux, et le lac ne s'est certainement pas refroidi. La journée du 13 février a été splendide, une des plus belles journées de l'hiver. Les mesures de température prises à midi dans le port de Genève, à un mètre sous la surface, ont donné :

13 février	+ 5.0°
14 —	+ 5.0°

Nous pouvons donc affirmer que le 14, au matin, l'eau du lac était au moins à 5°. C'est donc sur de l'eau au-dessus du maximum de densité que la neige tombait, et n'a pas tardé à tenir.

La chute de neige a-t-elle été assez puissante pour refroidir jusqu'à

4° les points du lac où les glaçons de neige ont été observés? Je ne le crois pas. Les observatoires de Genève et de Lausanne ont mesuré la quantité de neige tombée dans les 24 heures, du 14 au 15 février, et l'ont trouvée de 10.8 à 15^{mm} d'eau. Supposons que jusqu'à 4^{h} du soir, heure où le phénomène a été constaté sur le lac, la moitié de cette chute ait eu lieu, et évaluons-la à 8^{mm} d'eau de neige. Cette neige, en fondant dans l'eau, aura absorbé de la chaleur et refroidi le lac. A 80 calories pour la chaleur latente de la glace, une couche de neige de 8^{mm} d'eau aurait pu abaisser d'un degré, et ramener de 5° à 4° une couche d'eau, de 64^{cm} du lac, mais pas plus. Or dans toutes les localités où les glaçons de neige ont été vus, la profondeur du lac était de 2^{m} au moins, de 4^{m} et plus. Il me paraît donc impossible que la chute de neige ait ramené à 4° toute la couche d'eau sous-jacente à nos glaçons de neige.

Nous avons donc à considérer la superposition très anormale que voici :

A la surface, glaçons de neige à . . . . . 0°
Eau profonde, près de . . . . . 5°

C'est là une stratification thermique tout-à-fait extraordinaire. En effet, on rencontre dans la nature : ou bien la stratification directe [1] dans laquelle le fond de l'eau est à 4° et les couches supérieures sont plus chaudes, ou bien la stratification inverse, dans laquelle le fond est à 4° et les couches supérieures sont plus froides. Mais trouver sur la même tranche verticale une stratification qui a dû présenter la série suivante :

Surface. 0° 1° 2° 3° 4° 4.5° 5° 4.5° 4° *Fond.*
Stratification inverse — Stratification directe

C'est-à-dire à la surface stratification inverse, au fond stratification directe ; et entre deux.... stratification instable. Car la superposition :

surface . . . 4° . . . 4.5° . . . 5° . . . *fond*

fait reposer de l'eau plus dense sur de l'eau plus légère. — C'est là un fait que je n'avais jamais rencontré, que j'aurais même tenu pour impossible.

[1] Voir ci-dessus, p. 296.

Et cependant le fait a eu lieu. L'équilibre dans ces conditions est-il encore stable ? La densité de l'eau à 0° est plus faible que celle de l'eau à 5° ; la première doit donc flotter sur la seconde. Il n'y a dans une telle stratification qu'une seule cause d'instabilité, c'est la présence d'une couche entre 3° et 5° superposée à une couche de 5°. Mais en admettant que cette couche d'eau lourde était extrêmement mince, et en faisant attention que la couche d'eau de fusion se reproduisait sans cesse par la chute continue de la neige, on peut comprendre comment l'équilibre ait pu se maintenir, ou se rétablir sans cesse.

Ce fait est cependant très curieux et intéressant à noter ; il est l'un des plus compliqués que puisse présenter la stratification thermique de l'eau.

IV. **Bilan thermique.**

Les résultats numériques de mes sondages thermométriques me permettent de tirer des déductions intéressantes sur le rôle du lac comme agent climatique. Le lac est un modérateur du climat, il emmagasine de la chaleur en été, il la restitue en hiver.

Quelle est la valeur de cette action ?

Le problème se pose ainsi : Quelle est la quantité de chaleur gagnée par le lac pendant la période de réchauffement ? quelle est la quantité dégagée par le lac en période de refroidissement ?

Pour le rechercher j'établis, pour chaque jour d'observation, la quantité de chaleur emmagasinée dans l'eau. Une quantité de chaleur se mesure en calories ; la calorie sera donc l'unité à employer dans cette étude.

Il s'agit ici d'eau ; par conséquent je puis choisir, pour température initiale à laquelle je rapporte toutes mes comparaisons, la température de glace fondante. Un kilogramme d'eau à 5° aura donc, au-dessus de cette base fixe de zéro centigrade, une quantité de chaleur de 5 calories, un kilogramme d'eau à 10°, 10 calories, et ainsi de suite.

Je considère d'abord une colonne verticale d'eau prise dans la région de profondeur maximale du lac, de 310^{m} de hauteur par conséquent. Je donne à cette colonne une section de 1^{cm^2}. Avec une telle section, une hauteur de 10^{m} représente un volume de 1^{kg}. La température de cette eau exprimée en degrés centigrades indiquera donc la

quantité de calories emmagasinées au-dessus de la base fixe que j'ai choisie (0°C). Si j'additionne les mesures thermométriques faites de 10 en 10m, depuis la surface jusqu'à 300m de profondeur, j'obtiens ainsi la somme de calories accumulées dans cette colonne verticale du lac. Pour faciliter la comparaison avec d'autres calculs analogues, je préfère employer comme unité de surface le décimètre carré. J'ai donc à multiplier par 100 les chiffres obtenus pour ces colonnes de 1cm². (1)

Exemple du calcul de ce bilan thermique : Sondage thermométrique n° *1*, du 14 mai 1879.

Profondeur	0m	Température	10.3°
	10		7.2
	20		7.0
	. . . .		. . . .
	300		5.2

La somme de ces températures me donne 177.7°, ce qui représente 177.7 calories emmagasinées par une colonne de 1cm² de section, et de 310m de hauteur, ou 17 770 calories par une colonne de 1dm², pour l'amener de 0° à la température du 14 mai 1879.

Par des calculs semblables, j'obtiens les chiffres du tableau suivant, où je donne la somme des calories au-dessus de zéro d'une colonne de 1dm² prise sur la plaine centrale du Léman. Pour les dates où la comparaison peut être utile, j'indique en outre la différence totale entre deux sommes consécutives, et enfin le gain ou la perte en calories pour une journée, en divisant la différence par le nombre de jours écoulés entre les deux dates.

Sondage		Date	Somme des calories au-dessus de 0° pour 1 dm²	Différence totale	Différence journalière
N° *1.*	1879	14 mai	17 740 cal.	— cal.	— cal.
2.	—	21 juin	19 620	+ 1880	+ 49
3.	—	24 juillet	21 030	+ 1410	+ 43
4.	—	20 août	21 630	+ 600	+ 22
5.	—	24 septembre	20 890	— 740	— 21
6.	—	23 octobre	19 290	— 1600	— 55
7.	—	19 décembre	16 590	— 2700	— 47

(1) Cette méthode a été indiquée dans nos Recherches sur la température du Léman, Arch. de Genève III, 501 et IV, 89, 1880.

Sondage		Date	Somme des calories au-dessus de 0° pour 1 dm²	Différence totale	Différence journalière
8.	1880	26 février	14 120 cal.	— 2470 cal.	— 36 cal.
10.	—	5 avril	14 770	+ 650	+ 17
13.	—	29 juillet	19 330	+ 4560	+ 40
15.	—	8 septembre	19 560	+ 230	+ 5
16.	—	30 novembre	17 850	— 1710	— 21
18.	1881	5 novembre	18 160	—	—
19.	1883	26 février	17 520	—	—
20.	1884	15 mars	18 070	—	—
21.	—	16 août	21 090	+ 3020	+ 20
38.	1886	16 mars	16 420	—	—
41.	—	25 juin	20 340	+ 3920	+ 38
43.	1889	19 septembre	18 460	—	—
44.	1891	24 janvier	13 400	—	—
45.	—	21 février	12 740	— 660	— 24
48.	—	6 mars	12 790	—	—
49.	—	4 avril	12 750	—	—
50.	—	22 juin	16 210	—	—
51.	1892	16 janvier	14 000	—	—
52.	—	28 mars	14 940	—	—
53.	1894	6 février	16 180	—	—

De ce tableau, je tire en particulier les faits suivants :

1° Dans la phase de réchauffement du lac, le gain journalier en chaleur s'élève en moyenne à 30, 40 et 50 calories par décimètre carré de la surface.

2° Dans la phase de grand refroidissement, la perte journalière de chaleur atteint 35, 45 et 55 calories pour la même superficie.

Le maximum d'action réchauffante semble être au printemps, le maximum d'action refroidissante semble être en automne, quand la différence entre la température de l'air et de la surface de l'eau est la plus forte.

3° Les extrêmes de chaleur emmagasinée dans la masse du lac nous sont donnés aux dates de :

20 août 1879,	sondage	n° 4.	par	21 630	calories	par dm²
21 février 1891,	—	n° 45,	—	12 740	—	
		différence		8 890	—	

La différence entre les extrêmes s'élève donc à :

près de 8900 calories par décimètre carré
soit 890 mille calories par mètre carré
soit 890 milliards de calories par kilomètre carré.

Il peut donc y avoir une quantité considérable de chaleur emmagasinée dans le lac, ou dégagée par lui, dans les saisons extrêmes.

4° Pouvons-nous de ces chiffres tirer une valeur approximative de la chaleur emmagasinée dans le lac dans son ensemble ? Essayons de faire un calcul en prenant les sondages de la même année :

Sondage n° 4. 20 août 1879.	Somme des calories	21 630	par dm²
— n° 8. 26 février 1880.	—	14 120	—
	différence	7 510	—

Donc, de l'été 1879 à l'hiver 1880 le Léman avait perdu :

7510 calories par décimètre carré
750 milliards de calories par kilomètre carré de la région centrale du lac.

Cela représente une somme énorme de chaleur dégagée par le Léman, pendant cette saison froide ; une partie s'est perdue par rayonnement dans les espaces cosmiques, mais une bonne partie aussi s'est dégagée dans l'atmosphère ambiante et a tendu à atténuer les rigueurs d'un hiver qui sans elle eût été terrible. Tandis que cet hiver a partout ailleurs, dans l'Europe centrale, été extraordinairement rigoureux, sur les bords du Léman il a été relativement modéré, et à Morges, en particulier, ainsi qu'à Genève, le thermomètre n'est pas descendu au-dessous de — 15°.

Avons-nous le droit de poursuivre notre calcul et d'attribuer à l'ensemble du lac la même somme de calories dégagées par la région centrale du lac pendant la saison froide de 1879-1880 ? de multiplier notre chiffre de 750 milliards de calories au kilomètre carré par le nombre de kilomètres de la superficie du Léman ? — Non, certainement non, si nous voulons être absolument exacts. Partout où le lac a une profondeur moindre que la région centrale, la masse d'eau étant moins épaisse emmagasine une quantité moindre de chaleur ; la colonne est moins haute et la somme des calories est plus faible. Je devrais donc, semble-t-il, pour arriver à des valeurs plus justes, m'adresser non pas aux chiffres obtenus pour la profondeur maxi-

male du lac, mais chercher des chiffres analogues pour une profondeur moyenne. Cependant, si je donne attention au fait que pendant l'été la région littorale se réchauffe ordinairement plus que la région pélagique, qu'elle se refroidit plus en hiver, j'arrive à l'impression que pour un calcul qui n'a aucune prétention à une approximation serrée, je puis assez légitimement étendre à l'ensemble du Léman les valeurs obtenues pour la région centrale du Grand-lac. Toutes réserves étant donc faites au sujet de la témérité d'une telle extension, voici le résultat qu'elle me donne :

A raison de 750 milliards de calories dégagées par chaque kilomètre carré de la superficie du Léman pendant la saison froide de 1879 et 1880, le dégagement total pour l'ensemble des 582$^{km^2}$ du lac serait de :

436 500 milliards de calories.

C'est une quantité considérable de chaleur. Mais un chiffre aussi énorme n'est pas assimilable par l'imagination. Essayons de l'apprécier par une comparaison, un peu triviale, mais plus intelligible. La chaleur dégagée par la combustion du carbone est de 7 800 calories; un kilogramme de charbon brûlé à l'air dégage 7 800 calories. Donc nos 436 500 milliards de calories représentent la quantité de chaleur qui serait dégagée par la combustion de :

55 milliards de kilogrammes de charbon.

ou 55 millions de tonnes de mille kilogrammes chacune,

ou, si l'on veut traduire autrement ce chiffre qui est lui-même énorme, 5 500 mille vagons de chemin de fer, chargés chacun de 10 tonnes de houille. Si chaque vagon mesure 6^{m} de longueur, cela représente un train de 33 000^{km} de longueur. Ce train dépasserait les $^{4}/_{5}$ de la circonférence de la terre.

Diminuons ce chiffre de $^{1}/_{4}$, de $^{1}/_{3}$ si l'on veut, pour tenir compte de l'erreur, que nous avons commise en étendant à la région littorale le calcul qui n'est strictement valable que pour la région centrale du lac, et nous aurons encore une valeur suffisamment imposante. Elle réjouira les riverains du Léman en leur montrant quel puissant calorifère est pour eux le lac qui emmagasine en été une telle quantité de chaleur qu'il leur rend gratuitement dans la saison froide de l'hiver.

Cela explique en partie la douceur relative d'un climat qui, au centre du continent, à une assez grande altitude, et au pied des Alpes serait, sans le lac, bien plus exagéré dans ses extrêmes qu'il ne l'est en réalité.

Pour mieux apprécier l'action climatique du Léman, supposons pour un instant que le lac n'existât pas ; qu'un entonnoir suffisant, situé dans la plaine centrale, évacuât par un émissaire souterrain les eaux du Rhône et des autres affluents. Au milieu de la vallée subalpine, il y aurait une vaste dépression, descendant jusqu'à 62m d'altitude absolue. Quel serait son climat ? Il n'est pas besoin de beaucoup d'imagination pour se le figurer. Ce serait en été une plaine à température très élevée, au fond de laquelle l'air serait lourd et humide, dans la partie occidentale tout au moins (1). En hiver, au contraire, l'air refroidi sur les sommets des Alpes et du Jura s'accumulerait en nappe glacée dans le fond de la cuvette, et une inversion exagérée de la température abaisserait à un degré très bas les minimums de la saison froide. Le climat serait extrême, en été très chaud, en hiver très froid ; au lieu du climat tempéré, à caractère presque océanique, qui est l'apanage de notre vallée, la plaine du Léman dépourvue de son lac souffrirait d'un climat continental suraigu. Nous avons mille raisons de jouir de notre lac et des avantages divers qu'il nous procure ; ces considérations de climatologie hypothétique nous feront peut-être apprécier mieux encore les services qu'il nous rend.

V. Effet thermique du lac sur le fleuve qui s'y repose.

Quel est l'effet du lac sur la température du Rhône ? Les eaux de l'émissaire sont des eaux de surface : elles sont généralement plus chaudes que celles du Rhône du Valais, affluent principal du Léman ; elles sont souvent plus chaudes que celles des petits affluents du lac. Le séjour du fleuve dans le lac occasionne donc un réchauffement de ses eaux. Ce réchauffement est-il important ? Essayons de l'apprécier.

Nous savons quel était le débit moyen du Rhône du Valais pour l'année 1886 (2) ; ce n'est pas trop forcer les choses que de la considérer comme une année moyenne. Nous savons aussi quelle était la température du fleuve dans cette année-là (3). Nous connaissons de

(1) La partie de cette plaine traversée par le Rhône bénéficierait de la condensation de la vapeur sur les eaux relativement froides du fleuve, et jouirait en partie de la sécheresse relative de l'air de la plaine du Valais.

(2) T. I, p. 360.

(3) T. I, p. 364.

même le débit et la température du Rhône de Genève [1]. La différence entre les débits du Rhône de Genève et du Rhône du Valais, nous pouvons l'attribuer aux affluents directs du lac auxquels nous donnerons la température que nous avons mesurée dans la Morge pour l'année 1889 [2]. Par un calcul dont il est inutile de publier les détails, nous pouvons, en multipliant le débit par la température, trouver quel est le nombre de calories apportées au lac ou enlevées à sa masse. Ce calcul sera de peu de précision parce que ses bases se rapportent à des années différentes ; mais, si l'on ne veut pas lui demander une approximation trop serrée, il nous donnera une idée de l'ordre de grandeur du phénomène. En voici les résultats :

Le Rhône du Valais apporterait chaque seconde, dans le lac, un volume moyen de 140^{m^3}, contenant 1214 mille calories. [3]

Les petits affluents du Léman auraient un débit moyen de $111^{m^3\,sec}$, apportant une quantité de 1392 mille calories par seconde.

D'une autre part, l'émissaire emporte $251^{m^3\,sec}$ d'eau chargée de 3484 mille calories.

La différence entre ces deux chiffres, soit 878 mille calories, représente la quantité de chaleur qui est emportée en moyenne, chaque seconde, par l'émissaire en plus de la quantité qui est apportée au lac par les affluents. Si nous multiplions cette valeur par le nombre de secondes de l'année, nous aurons la quantité de chaleur que le Rhône gagne annuellement par le fait de son séjour dans le Léman ; cette quantité s'exprime par le chiffre énorme de :

28 mille milliards de calories,

c'est-à-dire, pour employer la même notation que nous avons utilisée à propos du bilan thermique du lac, la quantité de chaleur développée par la combustion de 3 millions de tonnes de charbon.

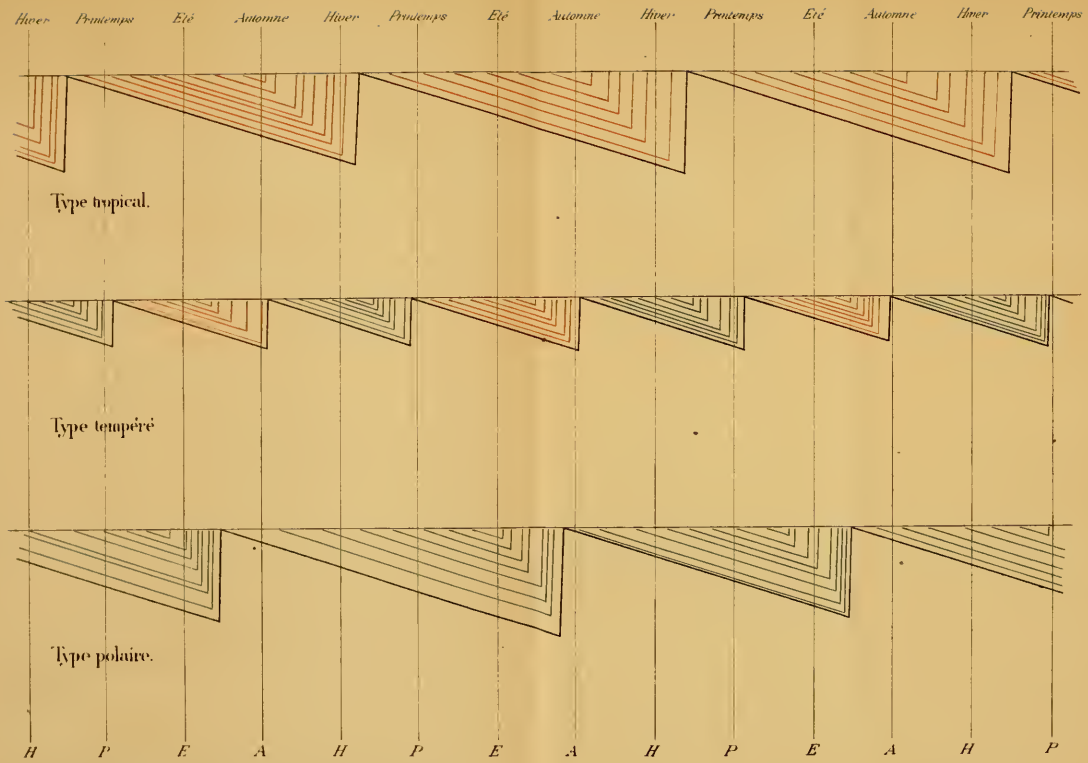
Tel est l'ordre de grandeur du bénéfice que fait le Rhône par son séjour dans le Léman.

C'est aussi la quantité de chaleur qui est enlevée à notre pays par le fleuve qui le traverse. La présence de ce fleuve et de ce lac est-elle

[1] T. I, p. 445 et II, p. 309.

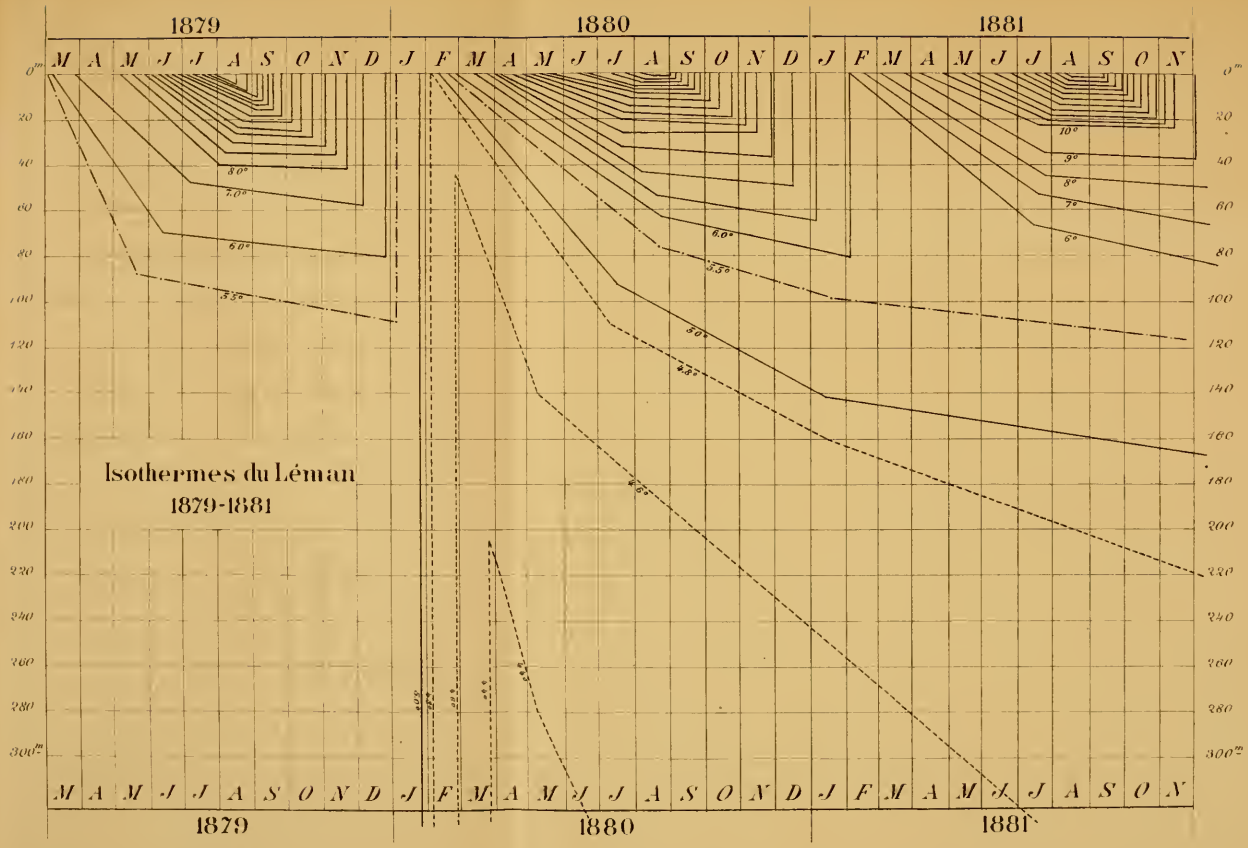
[2] T. I, p. 358.

[3] J'indique la quantité de chaleur par le nombre de calories nécessaire pour élever l'eau d'une température initiale que je fixe à 0°, jusqu'à la température observée.



Types thermiques des lacs d'eau douce F.A. Forel. 1889

Le Leman. Pl. VII.



F.A. Forel. Le Léman Pl. VIII

donc une cause de refroidissement du climat? Si le Léman n'existait pas, notre climat serait-il plus chaud? — Peut-être, oui. Les hivers seraient plus froids, mais les étés seraient notablement plus chauds et la température moyenne en serait peut-être plus élevée. Mais le détriment que nous subissons en perdant ainsi cette chaleur enlevée, sans compensation, par le Rhône qui traverse le lac est peu de chose en comparaison du bénéfice que nous donne le Léman comme réservoir de la chaleur estivale qui est rendue progressivement pendant la saison froide. Les milliards de calories enlevées par le Rhône de Genève, ne sont que la seizième partie de la chaleur dégagée par le lac pendant la saison froide de 1879-1880; ce n'en est ainsi qu'une fraction très faible.

Si le Léman n'eût pas existé, si le Rhône augmenté de ses affluents fût arrivé à Genève au travers d'une plaine, sans y arrêter ses eaux dans la cuvette d'un lac, le Rhône y aurait-il bénéficié au point de vue de la chaleur, ou y aurait-il perdu? Pour répondre à cette question, transformons les chiffres de notre calcul. Les $251^{m^3 sec}$ que débite l'émissaire de Genève emportent un excès de 878 mille calories sur celles apportées dans le lac par la même quantité d'eau des affluents; l'eau des affluents s'est donc réchauffée en moyenne de 3.5° pendant son séjour dans le Léman. Si le lac n'eût pas existé, si le Rhône du Valais eût continué son parcours à travers une plaine basse jusqu'à Genève, ne se fût-il pas réchauffé autant et plus? Quand je constate que le Rhône de l'été qui, pour la plus grande part est de l'eau de fusion des glaciers, partant par conséquent des Alpes à la température de 0°, arrive au lac avec 10° et 12° de chaleur, je me figure que s'il eût prolongé son trajet en plaine pendant 73 kilomètres, du Bouveret à Genève, il eût continué à gagner de la chaleur, probablement plus que les 3.5° qu'il a acquis en stationnant dans le lac.

Il ne paraît donc pas que le repos que subit le Rhône dans le Léman ait notablement changé les conditions thermiques moyennes qu'il aurait eues si le lac n'eût pas existé. La variation de température de l'été à l'hiver eût été certainement plus grande, mais la température moyenne eût été probablement à peu près la même.

Encore ici, le lac agit comme un modérateur, aussi bien sur le Rhône qui le traverse que sur la climatologie générale du pays.

HUITIÈME PARTIE

OPTIQUE

Les phénomènes limnologiques qui appartiennent au domaine de l'optique sont nombreux ; je n'en ai étudié ou observé que quelques-uns que je grouperai artificiellement en quatre classes :

1° La transparence de l'eau et les phénomènes qui se lient à la pénétration de la lumière dans l'eau.

2° La couleur de l'eau.

3° Les phénomènes de réflexion.

4° Les phénomènes de réfraction et les mirages à la surface du lac.

I. PHÉNOMÈNES DE PÉNÉTRATION DE LA LUMIÈRE DANS LES EAUX.

Nous étudierons successivement la transparence de l'eau du lac, et un certain nombre de phénomènes accessoires qui se relient à la pénétration des rayons lumineux dans les couches liquides.

1. Transparence de l'eau du lac.

L'eau dans la nature, quelque limpide qu'elle apparaisse, n'est pas absolument transparente ; elle arrête bientôt les rayons lumineux. Ce n'est qu'avec des soins très minutieux et des artifices de laboratoire

fort compliqués que J.-L. Soret est arrivé à obtenir de l'eau qui parût physiquement pure, qui, par exemple, ne laissât pas voir la trace d'un rayon lumineux concentré par une lentille. Ce qui lui a le mieux réussi pour purifier ainsi l'eau, c'est, après des distillations répétées et compliquées, le repos absolu en flacons fermés, prolongé pendant des mois et des années (1). Au bout d'un long temps, tous les corps en suspension se sont ou élevés à la surface, ou précipités sur le fond du vase, et l'eau semble absolument pure.

De l'eau physiquement pure absorberait-elle encore les rayons lumineux ? C'est probable.

L'eau du lac Léman est célèbre par sa transparence. Elle est, en effet, bien plus limpide que celle des fleuves et rivières de la plaine, et que la plupart des petits lacs et étangs. Mais elle est loin d'être parmi les plus transparentes, et sa transparence n'est que très relative comme nous allons le voir.

Nous avons étudié la transparence des eaux du lac Léman par trois méthodes différentes :

1° En cherchant la limite de visibilité par la méthode du Père Secchi et par la méthode de la commission genevoise.

2° En cherchant la limite d'obscurité absolue pour les substances photo-sensibles.

3° En interrogeant les plantes et animaux de la région profonde.

Nous renverrons à une autre partie cette dernière méthode dont l'exposé implique la connaissance des faits de la biologie du lac, et je ne traiterai ici que les deux premières.

A. *La limite de visibilité, étudiée par la méthode du Père Secchi.*

Pour étudier la transparence d'un corps, le procédé le plus simple est de chercher l'épaisseur de ce corps qui arrête complètement les rayons visuels. Dans le cas spécial de la transparence des eaux, les navigateurs de tous les temps ont fait descendre dans l'eau un corps blanc, une assiette de porcelaine et ont noté la profondeur à laquelle elle disparaît à l'œil (2). Cette observation élémentaire a été élevée à la valeur

(1) Communication personnelle de Soret.

(2) Voir l'énumération des études anciennes et modernes faites par cette méthode dans *O. Krümmel*. Bemerkungen über die Durchsichtigkeit des Meerwassers. Ann. der Hydrographie, 1889. II, 62.

d'une méthode scientique par le Père A. Secchi, de Rome, qui, en 1865, fit au large de Civita-Vecchia une campagne pour déterminer, par ce procédé, la transparence des eaux de la Méditerranée. (1)

Pour simplifier la description, j'ai introduit la désignation de Méthode du Père Secchi pour l'étude de la transparence des eaux qui cherche la limite de visibilité d'un disque blanc descendu dans l'eau. Ce n'est pas à dire que nous n'ayons pas notablement modifié les dispositions de l'illustre physicien du Collège romain.

J'emploie, ou bien un disque en feuille de zinc, vernie en blanc, de 20cm de diamètre, attachée à une corde graduée, ou bien une assiette de faïence blanche, de mêmes dimensions. La plaque de métal est moins fragile ; l'assiette en faïence conserve plus longtemps sa couleur blanche. Quel que soit le disque blanc, je le fais descendre dans l'eau et je cherche la profondeur à laquelle il disparaît à l'œil en descendant, celle à laquelle il apparaît à l'œil en remontant ; la moyenne de ces deux chiffres me donne la profondeur limite de visibilité.

Pour éviter l'effet d'éblouissement que cause la réflexion sur la surface de l'eau d'un ciel trop brillant, il est bon de tenir un parapluie noir ouvert au-dessus de la tête ; en son absence, j'y supplée en penchant assez mon corps en dehors du bateau pour que le disque apparaisse au milieu de l'image de ma tête, laquelle, mal éclairée, réfléchit très peu de lumière.

L'état de la surface de l'eau a une importance très grande dans l'observation. S'il fait des vagues, ou si seulement le lac est ridé par les petites vaguelettes d'une brise légère, les rayons lumineux sont tellement brisés, réfractés et réfléchis en divers sens, que l'on ne voit pas ou l'on ne voit que mal l'objet qu'il faut suivre sous l'eau. Je cherche donc à opérer autant que possible par un lac calme ; en temps de brise, ou bien j'oriente mon bateau de manière à faire l'observation du côté tranquille, sous le vent, ou bien j'éteins les vaguelettes à l'aide de quelques gouttes d'huile versées à la surface ; ou encore, j'utilise la lunette à eau ou le baquet à fond de verre de nos pêches lacustres (2) ; la lame de verre du baquet absorbe une certaine quantité de lumière, et j'évalue à 30cm environ la différence de profondeur de visibilité suivant que je me sers ou non de cet instrument.

(1) *A. Secchi.* Relazione dell' esperienze fatte a bordo della pontificia pirocorvetta l'Immacolata Concezione per determinare la trasparenza del mare. In *A. Cialdi.* Sul moto ondoso del mare, p. 258, sq. Roma, 1866.

(2) Voir t. I, p. 2.

La grandeur du disque a une certaine influence sur la profondeur limite de visibilité. Dans ses expériences comparatives, le P. Secchi a vu la limite être :

pour un disque de	2.37^m	de diamètre	à	35.5^m
—	0.43^m	—		29.5^m

Pour les disques de petit diamètre que j'emploie, cet effet est moins sensible : je n'ai pas vu de différence appréciable entre un disque de 20^{cm} et un disque de 35^{cm} de diamètre, et pour plus de commodité, j'ai choisi en définitive un disque de 20^{cm} qui est moins encombrant en voyage.

Tant que la limite de visibilité n'est pas trop profonde, comme cela est le cas dans la grande généralité des lacs, la grandeur du disque peut être négligée. Je ne vois pas de raison pour que l'œil distingue mieux une surface large qu'une surface étroite, tant que celle-ci n'est pas réduite par la distance à l'état d'un point trop petit. A 20^m de profondeur, un disque de 20^{cm} de diamètre sous-tend encore un angle de 34 minutes, ce qui est certainement parfaitement discernable. Pour des lacs très transparents, dont la limite de visibilité dépasserait 30^m, il serait peut-être prudent d'augmenter la grandeur du disque.

Il est cependant une circonstance qui peut obliger à l'emploi de disques de grande surface; c'est si l'on est appelé à faire des observations en eau profonde par un temps de vagues. L'image, brisée par les réfractions différentes sur les diverses facettes des vagues, peut échapper à la vue si elle est trop petite. Mais sur nos lacs, où nous sommes mieux que sur la mer maîtres de choisir un temps propice, cet inconvénient peut être évité, et je ne vois aucune nécessité à prendre un disque plus grand que celui que j'ai adopté.

Quel est l'effet de l'éclairage ? de la hauteur plus ou moins grande du soleil sur l'horizon, de sa présence ou de son absence ? Telle est la question importante que nous devons avant tout discuter.

Selon le jour de l'année et l'heure de la journée, le soleil est haut ou bas sur l'horizon ; à notre latitude de $46^o27'$, le maximum de hauteur le 22 juin est 67°. Or, suivant l'angle d'incidence des rayons sur la surface supposée plane, une plus ou moins grande partie de cette lumière sera réfractée, c'est-à-dire pénètrera dans le lac, une plus ou moins grande partie sera réfléchie et n'aura aucun effet sur l'éclairage des objets logés dans l'eau. Si le soleil était à l'horizon, aucun rayon direct ne pourrait pénétrer dans la surface à laquelle il serait tangent, et tout

l'éclairage de l'eau se ferait par la lumière diffuse du firmament ; si le soleil était au zénith, tous les rayons, ou peu s'en faut, pénétreraient à travers la surface de l'eau à laquelle ils seraient normaux ; dans les positions intermédiaires que le soleil occupe sous nos latitudes, il y a d'autant moins de rayons réfléchis, et par conséquent d'autant plus de rayons pénétrant dans l'eau que le soleil est plus élevé sur l'horizon.

Il en résulte que les objets placés dans l'eau doivent être d'autant mieux éclairés que la hauteur du soleil est plus grande ; il est probable, à première vue, que la hauteur du soleil aura une influence très notable sur la profondeur limite de visibilité.

C'est ce que les expériences du P. Secchi, dans la Méditerranée, avaient fort bien montré. Dans son expérience II, par exemple, du 21 avril 1865, avec son grand disque de 2.4^{m} de diamètre, il avait trouvé les limites de visibilité suivantes :

Hauteur du soleil 25°43′	limite de visibilité 24.5^{m}
45.24	33.9
59.52	36.7

Le raisonnement et l'expérience du P. Secchi attribuant ainsi une grande influence à la hauteur du soleil, j'ai été fort surpris des résultats que j'ai d'abord obtenus dans le lac Léman ; pendant longtemps j'ai été incapable de constater cette influence de la hauteur du soleil. Je trouvais dans la même journée, pendant l'été de 1874, la profondeur limite de visibilité tellement semblable, quelle que fût l'heure et par conséquent la hauteur du soleil, que j'arrivai à refuser toute action à l'intensité de l'éclairage [1]. Je ne trouvais même pas de différence dans cette profondeur avant ou après le coucher du soleil ; elle était la même 10 minutes avant et 10 minutes après le coucher apparent du soleil.

Je ne citerai ici que deux de ces expériences :

3 juillet 1874, devant Morges.

Heure	Hauteur du soleil	Limite de visibilité
8^{h}10^{min}	37°14′	7.3^{m}
12 00	66.26	7.6
17 30	22.50	7.5
18 30	12.52	7.5
19 00	8.6	7.5

[1] Voir pour le détail des expériences : *F.-A. Forel*. Matériaux pour l'étude de la faune profonde du Léman. Bull. S. V. S. N., XIV, 137 sq. Lausanne, 1876.

26 octobre 1874, devant Morges.

Heure	Hauteur du soleil	Limite de visibilité
$16^h 36^{min}$	2°59′	11.2^m
— 45	coucher apparent du soleil	
— 47	1.11	11.2
— 55	—0.6	11.2

La différence entre les chiffres extrêmes de la profondeur de visibilité ne dépassait pas la limite des erreurs d'observation et l'influence du lieu où l'on opère, comme on le verra plus loin. Le résultat de ces expériences n'était donc pas conforme à l'opinion théorique que je m'étais faite, non plus qu'avec les observations du P. Secchi.

J'ai dû faire intervenir une hypothèse : l'obstacle à la vision serait dû non à l'absorption de la lumière par l'eau, mais à la présence de poussières en suspension dans l'eau.

Dans une eau physiquement pure, la cause de la disparition d'un corps éclairé serait l'absorption des rayons lumineux par l'eau elle-même ; absorption des rayons solaires qui éclairent le corps, absorption des rayons réfléchis par le corps éclairé ; dans ce cas, il est évident que l'intensité de l'éclairage aurait une grande influence sur la profondeur limite de visibilité.

Si l'eau contient des matières en suspension, les conditions sont tout autres. Le corps éclairé, le disque blanc que nous faisons descendre dans une eau ainsi opalinisée, nous le faisons pénétrer dans un nuage, dans un brouillard formé par les corpuscules opaques flottant entre deux eaux. Dans ces conditions, l'éclairage, l'éclat de l'objet que nous contemplons, n'a presque aucune influence sur son apparition ou sa disparition. Tant que les poussières, ou les vésicules du brouillard laissent passer entr'elles quelque rayon lumineux, un corps quelconque, même noir, reste encore visible ; sitôt que par leur superposition optique elles forment un écran continu, le corps, quelqu'éclairé, quelque brillant qu'il soit, disparait à nos yeux.

Là donc où l'éclairage de l'objet contemplé a une action manifeste sur la limite de visibilité, nous devons attribuer la disparition du corps à l'absorption des rayons lumineux par l'eau elle-même ; là où cet éclairage n'a point d'effet, là où la profondeur limite de visibilité reste la même quelle que soit la hauteur du soleil, nous devons admettre la présence d'un nuage de corpuscules faisant écran optique et arrêtant les rayons réfléchis par le corps en observation.

De là, la différence entre les observations du Père Secchi qui opérait dans l'eau limpide de la Méditerranée, et les miennes qui étudiaient les eaux plus opalines du lac Léman.

J'ai confirmé ces observations sur le peu d'effet de l'intensité de l'éclairage en interrogeant non plus la hauteur du soleil qui faisait pénétrer plus ou moins de rayons réfractés, mais en m'adressant à l'écran naturel formé par un nuage atmosphérique. En opérant dans le lac sous un ciel traversé par des nuages qui, tantôt me couvraient de leur ombre, tantôt laissaient dans leurs intervalles arriver sous mon bateau l'éclairage du soleil, j'ai obtenu pour la limite de visibilité des chiffres égaux :

23 juillet 1874. Devant Morges.

Heures		Limites de visibilité
18^h45^m	en plein soleil	4.2^m
19.15	à l'ombre d'un nuage	4.2
19.20	en plein soleil	4.2

En étudiant cette limite par un beau jour de grand soleil et le lendemain par un temps fort sombre, j'ai même eu une différence en sens inverse de l'intensité de l'éclairage :

27 juillet 1874	beau soleil	5.0^m
28 — —	ciel noir, pluie battante	5.2

Il n'y a pas, du fait de l'éclairage, de différence sensible dans la limite de visibilité.

Il est encore un détail d'observation qui confirme cette interprétation. Si l'extinction de la visibilité est due à l'absorption de la lumière dans l'eau pure, cette extinction doit être très graduelle, très lente, très insensible ; à la limite de visibilité, il doit y avoir incertitude sur la profondeur où a lieu la disparition. Si l'extinction a lieu par la formation d'un écran de corpuscules superposés optiquement, la limite de disparition doit être beaucoup plus nette, beaucoup mieux marquée (1). Or, dans toutes les expériences que je relate ici, j'ai toujours été frappé de la précision, de la soudaineté de disparition du disque blanc ; pendant la descente, je vois nettement la surface éclairée, puis tout à coup je ne la vois plus ; il n'y a pas 30^{cm}, souvent pas 20^{cm} d'incertitude sur la profondeur limite de visibilité ; il n'y a pas cette différence entre les deux

(1) C'est presque subitement qu'apparaît un objet qui s'approche de nous dans un brouillard, un navire, par exemple, sur le lac.

mesures de l'observation, l'une disparition à la descente, l'autre première apparition à la montée; il n'y a pas cette différence entre les chiffres de deux observateurs différents suivant de l'œil le même objet.

Ainsi donc l'hypothèse ci-dessus énoncée, qui attribue la disparition d'un objet immergé dans l'eau à la formation d'un écran de poussières opaques, semble parfaitement justifiée.

Mais dans mes expériences, il est une série de cas divergents qui complètent la démonstration. Comme je vais le dire plus loin, il y a de grandes différences saisonnières dans la transparence de l'eau: en hiver les eaux sont beaucoup plus limpides qu'en été: si mon hypothèse est exacte, si l'opalinité des eaux de l'été est due à des poussières et la plus grande transparence des eaux d'hiver à la moins grande abondance de ces poussières, tous les caractères distinctifs de l'expérience doivent se modifier de l'été à l'hiver.

Il en est, en réalité, ainsi. Toutes les observations que j'ai citées jusqu'à présent ont été faites en été. Mais si je leur oppose les observations faites en hiver, alors que la limite de visibilité est à une profondeur double, je reconnais :

a. Que la hauteur du soleil a une influence reconnaissable dans le lac Léman, comme dans les expériences du Père Secchi. Ainsi, par exemple, mon expérience du 27 mars 1875 devant Morges m'a donné :

Heure	Hauteur du soleil	Limite de visibilité
$8^h\,55^{min}$	$29^\circ 10'$	15.0^m
11 55	45.58	16.8

La différence est très sensible.

b. Que le passage à l'ombre raccourcit notablement la limite de visibilité. Le même 27 mars 1875, tandis qu'à 9^h avec une hauteur de soleil j'avais une limite de visibilité de 15.0^m par un soleil brillant, à $16^h 20^m$, par une hauteur solaire de $21^\circ 36'$, à peine plus faible que le matin, mais par un ciel gris, la limite de visibilité est tombée à 13.7^m.

c. Enfin la précision de la disparition du disque à la limite de visibilité est beaucoup moins nette en hiver qu'en été: l'incertitude est plus grande et deux observations simultanées sont moins concordantes.

Ma conclusion est donc très positive, à savoir que l'opalinité des eaux du lac Léman est essentiellement due à des poussières en suspension dans l'eau.

— J'ai dit que l'intensité de l'éclairage des objets plongés dans l'eau avait peu d'importance sur leur visibilité. Cela est vrai pour la profondeur limite de visibilité. Cela ne l'est plus lorsqu'il s'agit de discerner des objets sur le fond, comme nous le faisons dans nos pêches d'antiquités lacustres sur les ruines des palaffites. Ces recherches se font à de petites profondeurs, sous 3 à 4^m d'eau. Dans ce cas, l'éclairage direct par le soleil aide puissamment à séparer par le regard des corps solides, uniformément colorés par une teinte grisâtre ; c'est leur relief seul qui les fait reconnaître, et l'ombre portée par les parties saillantes dessine le mieux leurs formes. Sitôt que le soleil était assez bas sur l'horizon pour que les rayons réfractés n'atteignissent plus le sol, nous étions obligés d'interrompre la pêche qui était facile un moment auparavant, tant que le soleil éclairait directement le fond.

Indépendamment de la perturbation locale apportée par les eaux torrentielles d'une pluie d'orage, la transparence des eaux du Léman varie dans deux conditions : il y a des variations régionales, certaines parties du lac sont plus limpides que d'autres, il y a des variations saisonnières. Indiquons d'abord le sens des secondes qui sont fort importantes.

Variations saisonnières.

Nous y avons été rendus attentifs en pratiquant nos pêches d'antiquités lacustres dans les stations de Morges ; il y a, au point de vue de la transparence de l'eau, une différence saisissante de régime entre l'hiver et l'été. Pendant les mois d'été, il est absolument impossible de voir le fond, et par suite de recueillir des monuments antiques que l'œil doit aller chercher dans les ruines des cités lacustres, sous trois à six mètres d'eau ; en hiver, au contraire, l'eau est généralement assez limpide pour permettre une pêche fructueuse. Quand en hiver les eaux ont été salies par l'agitation des vagues et par l'apport de l'eau boueuse des affluents, cette opacité ne dure pas longtemps ; le brouillard aquatique ne tarde pas à se précipiter, et en quelques jours le lac se clarifie. En hiver les eaux sont normalement claires ; en été elles sont toujours troubles ou plutôt opalines.

A quelle époque ont lieu ces changements de régime ? J'en donnerai une idée en cherchant, sur le registre des pêches d'antiquités lacustres faites à Morges par mon père et par moi, la date de la première et de la dernière trouvaille de chaque hiver.

	Dernière pêche de l'hiver	Première pêche de l'automne
1854	22 mai	—
1855	20 avril	—
1856	31 mars	—
1857	mai	—
1858	4 juin	21 septembre
1859	3 avril	18 octobre
1860	—	23 octobre
1863	2 avril	—
1864	—	2 novembre
1866	11 avril	—
1868	2 mai	—
1869	14 avril	11 octobre

D'après ces dates, la saison des pêches lacustres à Morges s'étendrait d'octobre à avril, la saison morte de mai à septembre.

Pour préciser des variations de transparence, j'ai employé la méthode du disque du Père Secchi, dans les années 1874 et 1875, en allant, aussi souvent que possible, mesurer la limite de visibilité devant Morges, à 500^{m} de la rive par 25^{m} de profondeur. [1]

Voici, page 418, en les groupant par mois et par saisons, les moyennes de 46 expériences comparatives.

Nous avons là, exprimée en chiffres d'une manière évidente, la différence de limpidité qui distingue les eaux de l'été de celles de l'hiver.

Les premières me donnent, si je partage l'année en deux saisons, à fin d'avril et fin de septembre, une limite de visibilité moyenne de 6.6^{m}, les secondes, les eaux d'hiver, une limite de visibilité de 12.7^{m}.

Nous chercherons plus tard les causes de cette variation annuelle de

[1] Outre les variations régionales très importantes que nous étudierons bientôt, il y a des différences fort évidentes d'un point à l'autre de la même côte. Dans le littoral, sur la beine, les eaux sont souvent sales et poussiéreuses ; les vagues d'une tempête ont soulevé la vase du bord, et pendant plusieurs jours les eaux peuvent rester louchies ; les eaux des affluents troublés par une crue se mélangent par l'action des vagues aux eaux littorales ; les eaux des égouts polluent les eaux ; devant une ville, les eaux sont toujours moins limpides qu'en plein lac ou sur une côte non habitée. Pour éviter ces perturbations locales, il est prudent d'aller étudier la transparence des eaux en plein lac, à une distance suffisante de la rive, et toujours au même endroit. Cela justifie le choix que j'ai fait de mon lieu d'observation.

Mois	Limite de visibilité	Mois	Limite de visibilité
Octobre	10.2^m		
Novembre	11.0	Mai	8.2^m
Décembre	11.5	Juin	6.9
Janvier	14.5	Juillet	5.6
Février	15.0	Août	5.3
Mars	15.4	Septembre	6.8
Avril	11.3		
Hiver	12.7	*Eté*	6.6

Moyenne annuelle : 10.15^m.

Maximum observé, 10 mars 1875, 12 h. : 17.0^m.

la transparence de l'eau, quand nous aurons constaté qu'elle est générale dans tout le lac.

Variations régionales.

Tout observateur des choses de la nature a pu reconnaître une différence notable dans la transparence des eaux du Léman, quand on se transporte d'une extrémité du lac à l'autre; les eaux sont plus limpides à Genève que dans le Haut-lac. Il était cependant convenable de vérifier expérimentalement le fait, et pour cela nous devions obtenir des recherches comparatives. Voulant demander le concours d'observateurs pris nécessairement en dehors de la classe des physiciens de cabinet, j'ai dû simplifier et préciser la méthode en négligeant les influences relativement peu importantes de la hauteur du soleil, de l'éclairage et de l'agitation par les vagues de la surface du lac. J'ai formulé mes instructions comme suit :

Instructions pour l'étude de la transparence du lac par la méthode du P. Secchi.

Il s'agit de déterminer la limite de visibilité d'un disque blanc plongé sous l'eau. Ce disque a 20^{cm} de diamètre et est porté par une corde graduée.

1° Transportez-vous en bateau dans un point du lac où la profondeur d'eau soit supérieure à 25^m.

2° Descendez le disque dans l'eau et suivez-le de l'œil, en vous penchant en dehors du bateau et en regardant le disque dans

l'ombre de votre tête ou de votre bateau, jusqu'à la couche où il disparaît à la vue. Notez la profondeur de cette couche.

3° Remontez lentement l'appareil et notez la profondeur à l'instant où le disque vous apparaît de nouveau. La moyenne entre ces deux mesures est la profondeur limite de visibilité.

4° Choisissez pour faire l'expérience un jour où le lac soit calme. S'il est ridé par une brise légère, placez le bateau perpendiculairement au vent et faites l'expérience du côté sous le vent.

5° Répétez l'expérience au moins une fois dans chaque moitié du mois, toujours à la même place dans le lac.

6° Notez la date, l'heure, l'état du ciel, l'état de l'atmosphère, l'état du lac (ciel bleu, brise de terre, rides — ciel gris, calme, lames de vaudaire, etc.), enfin la profondeur limite de visibilité.

Dans ces conditions, la méthode est assez rustique et grossière. Il y a possibilité d'erreur dans la détermination de la limite de visibilité, l'incertitude de ce fait peut atteindre suivant les saisons $^1/_3$ à $^3/_4$ de mètre ; il y a différence dans l'appréciation faite simultanément par deux observateurs dans la même station, l'écart peut s'élever à un mètre et plus ; il y a enfin les erreurs et variations causées par les actions perturbatrices de la hauteur différente du soleil, de l'éclairage différent suivant l'état du ciel, des conditions plus ou moins bonnes de l'observation qui peut être gênée par les rides du vent. Ce ne sont pas des expériences de laboratoire ; c'est de la physique en plein air, et il ne faut pas lui demander une rigueur à laquelle elle ne veut pas prétendre. Quoi qu'il en soit, elle nous a donné des résultats généraux intéressants qui découleront de la comparaison des séries.

J'ai obtenu pour ces observations le concours obligeant de diverses personnes : à Pully près Lausanne, M. Florian Duport, pêcheur actif et intelligent qui, sous la direction de M. Fl. Robert, a exécuté ces recherches de juillet 1889 à août 1891 ; sur la côte de Savoie, de M. l'ingénieur A. Delebecque, à Thonon, qui a fait faire par ses agents des Ponts et Chaussées français une série complète, de septembre 1889 à février 1891, dans les stations de Meillerie, Evian, Thonon et Nernier. J'exprime ici ma reconnaissance à ceux qui ont ordonné et exécuté ce travail. (1)

(1) *F.-A. Forel.* Transparence des eaux du Léman. Recueil inaugural de l'Université de Lausanne, p. 445. Lausanne 1892.

Je vais résumer les observations isolées en les groupant en valeurs mensuelles. Je place les stations dans l'ordre qu'elles occuperaient si elles étaient projetées sur l'axe du lac, et j'indique leur position par leur distance de l'embouchure du Rhône. J'intercale dans le tableau les anciennes observations que j'avais faites à Morges en 1874 et 1875.

Mes stations d'observation sont donc :

Meillerie,	côte	savoyarde,	à 10^{km} du Rhône		37	observations
Pully,	—	vaudoise,	18	—	50	—
Evian,	—	savoyarde,	23	—	36	—
Morges,	—	vaudoise,	28	—	46	—
Thonon,	—	savoyarde,	34	—	38	—
Nernier,	—	savoyarde,	48	—	33	—

Voici les moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles de la profondeur limite de visibilité dans ces six stations.

	Meillerie.	Pully.	Evian.	Morges.	Thonon.	Nernier.	MOYENNES
Décembre	11.7^m	13.8^m	14.4^m	11.5^m	16.0^m	14.5^m	13.7^m
Janvier	13.1	15.8	15.5	14.6	17.0	17.2	15.5
Février	13.1	15.7	15.3	15.0	14.8	14.0	14.7
Mars	12.9	11.2	13.9	15.4	12.8	11.8	13.0
Avril	8.2	8.9	7.9	11.3	14.3	12.5	10.5
Mai	8.0	6.5	5.9	8.2	10.4	10.9	8.3
Juin	6.8	5.2	8.2	6.9	7.7	8.3	7.4
Juillet	6.0	5.3	6.0	5.6	6.8	7.2	6.2
Août	5.6	7.5	8.4	5.3	8.2	6.7	7.0
Septembre	7.2	6.2	8.4	6.8	7.8	8.3	7.5
Octobre	8.4	9.6	9.0	10.2	8.5	8.8	9.1
Novembre	9.0	10.0	11.6	11.0	11.0	11.9	10.8
Hiver	12.6	15.1	15.1	13.7	15.9	15.2	14.6
Printemps	9.0	8.9	9.2	11.6	12.5	11.7	10.5
Eté	6.1	6.0	7.9	5.9	7.6	7.4	6.8
Automne	8.2	8.6	9.3	9.3	9.1	9.7	9.0
ANNÉE	9.0	9.7	10.4	10.1	11.3	11.0	10.2

Il n'y a pas une marche parfaitement régulière dans ces chiffres ; cela tient à ce qu'il ne représentent qu'un trop petit nombre d'observations ; une seule année pour plusieurs mois, deux années tout au plus, et dans

chaque mois deux ou trois observations seulement. Les circonstances accidentelles jouent un rôle trop important et, pour obtenir une courbe régulière, il faudrait un beaucoup plus grand nombre d'observations réparties sur plusieurs années.

Quoi qu'il en soit, il est deux faits qui sont très apparents dans l'ensemble de ces chiffres :

1° Le premier, en vérification des études antérieures, est la périodicité annuelle qui est visible dans toutes les séries ; les eaux de l'hiver sont beaucoup plus limpides que celles de l'été. Les moyennes des saisons se résument ainsi :

Hiver,	limite de visibilité,	14.6m
Printemps,	—	10.5
Eté,	—	6.8
Automne,	—	9.0
	Moyenne annuelle,	10.2m

Ou si je les répartis, comme je l'avais fait pour ma station de Morges, en deux saisons :

Saison d'hiver, d'octobre à avril,	limite de visibilité	12.5m
— d'été, de mai à septembre,	—	7.3

La variation annuelle est incontestable ; elle est bien marquée dans toutes les stations.

2° La variation régionale est très nettement indiquée dans les chiffres de notre tableau. Les eaux sont plus claires à mesure que l'on avance sur la longueur du lac. Les stations les plus rapprochées des bouches du Rhône ont les eaux les plus opaques ; plus on s'approche du Petit-lac, plus les eaux deviennent limpides. Cela est visible dans chaque saison ; cela est surtout évident dans les moyennes annuelles :

Meillerie,	limite de visibilité	moyenne,	9.0m
Pully,	—	—	9.7
Evian,	—	—	10.4
Morges,	—	—	10.1
Thonon,	—	—	11.3
Nernier,	—	—	11.0

Les faibles différences entre les chiffres d'Evian et de Morges, de Thonon et de Nernier, qui auraient dû être en sens inverse pour satis-

faire à la loi générale, s'expliquent facilement si l'on tient compte de la grossièreté de la méthode et de l'importance énorme qu'y a le facteur de l'équation personnelle de l'observateur.

— Un certain nombre d'observations isolées compléteront l'étude des variations régionales de la transparence du lac.

a. Quelques observations ont été faites dans l'été de 1891 par M. le Dr H. Schardt, dans les eaux du golfe de Territet, près Montreux. Il a trouvé pour la limite de visibilité :

en juillet, (moyenne de 3 observations)	4.0m
en septembre, 1 observation	6.5m

Si je compare ces chiffres aux moyennes mensuelles de la station de Meillerie qui m'a donné en juillet 6.0m et en septembre 7.2m, il apparaît que les eaux sont encore plus louches à Montreux qu'à Meillerie. Montreux étant plus près, à 5km, des bouches du Rhône, cela est conforme à notre loi.

b. Quelques observations sur la limite de visibilité ont été faites dans diverses régions du lac par la commission de la Société de physique de Genève, chargée de l'étude de la transparence des eaux (1). J'en extrairai les observations faites dans les environs de Genève, ce sont les seules que nous ayons dans cette région du lac. Voici les moyennes de la limite de visibilité étudiée par divers observateurs :

1er	juillet	1885	devant Bellevue	7.35m	7.8m
4	»	»	» »	6.30	
4	»	»	creux de Genthod	9.65	
14	août	»	Genthod	13.08	12.5
18	»	»	ss Malagny p. Genthod	11.65	

Les observations de Nernier, la station la plus voisine, à l'entrée du Petit-lac, n'ont donné pour les moyennes de juillet et d'août que 7.2 et 6.7m ; les observations de Bellevue et de Genthod à 16km aval de Nernier, nous offrant dans les mêmes mois une limite moyenne de visibilité de 7.8 et 12.4m, indiquent une beaucoup plus grande transparence de l'eau dans les environs de Genève. — Je me permets de réclamer de mes amis de Genève une confirmation expérimentale et définitive de ce fait intéressant.

(1) Mém. soc. phys. et hist. nat. de Genève XXIX, N° 11, tableau IV, p. 17.

Le maximum de transparence constaté sur le Léman, l'a été par moi-même le 21 février 1891, à 1.5^{km} au large d'Ouchy où j'ai trouvé pour la limite de visibilité une profondeur de 21^{m}. M. A. Delebecque était arrivé au même chiffre le 31 janvier de la même année entre Thonon et la Drance.

Variations locales.

Il y a de grandes différences dans la transparence de l'eau dans certaines localités de situation spéciale. Sous ce rapport, il y a lieu de considérer les causes de pollution de l'eau et les causes de clarification.

Des conditions favorables à une clarification rapide de l'eau sont évidemment la situation sur une côte largement ouverte au large, ou mieux sur un cap saillant, tandis que dans un golfe enfoncé et resserré les eaux se renouvellent mal et restent plus ou moins stagnantes.

Parmi les causes de pollution du lac, il y a d'une part les rivières et ruisseaux qui, en temps de crue, amènent des eaux chargées de matières terreuses, des eaux troubles, des eaux grises. D'une autre part, il y a les égouts des villes et villages qui jettent dans le lac des eaux contenant des matières organiques en suspension et en solution. Les premières, les organismes et débris d'organismes figurés, sont par elles-mêmes un obstacle à la pénétration de la lumière; les secondes, les matières organiques dissoutes, en favorisant le développement des organismes vivants, contribuent indirectement à la formation du nuage qui arrête la vue dans l'eau.

Suivant que les unes et les autres de ces conditions seront représentées, le lieu où l'on étudie la transparence de l'eau donnera des résultats différemment favorables. J'en donnerai deux exemples dans lesquels la distance du rivage sera indiquée par la profondeur du lac au lieu de l'opération.

1er juillet 1873. — Devant Morges.

8^{h}10^{min}	Profondeur	25^{m}	Limite de visibilité	6.0^{m}
10 00	—	90	—	7.5
10 30	—	25	—	6.0

2 septembre 1873. — Devant Morges,

9^{h}30^{min}	Profondeur	45^{m}	Limite de visibilité	8.2^{m}
10 15	—	90	—	9.2
11 00	—	25	—	7.8

Devant les quais de Morges l'eau est en été le plus souvent fort trouble, et la limite de visibilité est réduite à 2^m, souvent à 1^m.

Il est donc très important pour des observations comparatives de choisir une station bien située, toujours la même, suffisamment loin de la rive pour échapper à ces influences perturbatrices locales.

B. Cause des variations de transparence.

Il résulte de ces diverses séries d'observations que la transparence des eaux du lac présente deux ordres de variations générales. (1)

1° Elle est plus grande, l'eau est plus limpide en hiver qu'en été.

2° La limpidité va en augmentant dans le Léman de la région orientale à la région occidentale, ou si l'on veut de l'amont à l'aval, des bouches de l'affluent principal à l'origine de l'émissaire.

Quelle est la cause qui altère la limpidité du lac? Quelles sont les causes de ces variations?

Tout d'abord nous constatons que l'eau n'est pas infiniment transparente. Nous savons que certaines eaux sont plus limpides que celles du Léman (2), mais quelque pures qu'elles soient, on n'a jamais jusqu'à présent distingué un objet à travers une épaisseur de plus de 60^m d'eau ; on ne verra jamais à travers une couche de plus de 100^m ou de 150^m d'eau.

(1) Nous avons reconnu et étudié dans le lac de Constance des variations semblables et dans les mêmes sens et proportions. *F.-A. Forel.* Transparenz und Farbe des Bodensees. Schriften des Bodenseesvereins XXII, 33. Lindau 1893.

(2) L'eau la plus limpide que j'aie étudiée est celle du lac bleu de Lucel, la Gouille perse (*) d'Arolla, vallée d'Hérens. Valais. Le 26 août 1887, en regardant dans l'eau sur un miroir incliné à 45° qui rendait horizontal le rayon visuel, j'ai vu distinctement une feuille blanche que mon ami, Ed. Hagenbach, masquait et démasquait alternativement sous l'eau, à 60^m de distance, la plus grande longueur du lac. La netteté de l'image était telle que je suis persuadé que, si le lac eût été assez long, j'aurais pu la distinguer encore à 80 ou 100^m.

On connaît la limite de visibilité de quelques eaux très limpides : le lac Tahoë, dans la Sierra Nevada de Californie, 33^m (J. Le Conte) ; la Méditerranée au large de Civita-Vecchia, 42.5^m (A. Secchi) ; la mer des Antilles, 50^m (F.-L. de Pourtalès) ; l'Océan pacifique, 59^m (Wilkes). Le lac Lucel semble les dépasser toutes en limpidité.

(*) La gouille perse est un charmant lac de montagne situé à 2080^m d'altitude, alimenté par une belle source qui sort du rocher à quelques mètres du lac et n'a ainsi aucun trajet à l'air avant de se déverser dans le lac, lequel est d'une couleur azurée splendide. Son nom est écrit Gouille pair sur la carte du Club alpin de 1859. — Gouille est un mot du vieux patois romand qui signifie mare; pair a été mis pour pers. Pers au féminin perse est un adjectif du vieux français conservé dans les patois vaudois, valaisan, dauphinois, provençal et est synonyme de bleu ; la Gouille perse est donc la mare bleue.

L'eau a donc un pouvoir absorbant pour la lumière. M. H. Wild a déterminé, par des expériences directes, le coefficient de transparence de l'eau pure, et il a reconnu qu'il varie avec la température : plus la température est élevée, plus le pouvoir absorbant de l'eau augmente [1]. Pour l'unité d'épaisseur de un décimètre, M. Wild a reconnu que l'eau laisse passer la fraction suivante de la lumière incidente :

à + 24.4°	0.917 90
+ 17.0	0.939 68
+ 6.2	0.947 69

Y a-t-il dans cette absorption plus forte de la lumière pour l'eau plus chaude une explication suffisante de la plus grande opalinité des eaux d'été ? Je ne le pense pas.

J'ai d'abord quelques réserves à faire sur la valeur du coefficient de transparence de M. Wild ; il indique une absorption trop forte pour être appliquée à l'eau de nos lacs.

Si nous calculons, avec le coefficient donné par Wild à l'eau de 6°2, la fraction de lumière qui arrive à travers une couche d'eau de 6m, de 8m, de 10m, nous obtenons les chiffres très faibles de 0.04, 0.01, 0.005 de la lumière incidente. Or il est évident pour moi que pendant nos pêches d'antiquités lacustres de l'hiver, alors que nous voyons et reconnaissons avec la plus grande facilité sous 3, 4 et 5m d'eau [2] les objets les plus petits et délicats, des aiguilles ou des bagues, la quantité de lumière qui revient à notre œil après réflexion sur le fond est plus de 0.04 à 0.005 de la lumière incidente ; si le fond était aussi peu éclairé que le veut la formule de M. Wild, nous serions tellement éblouis par la lumière extérieure, 25 à 200 fois plus intense, que nous ne distinguerions absolument rien sous une couche d'eau aussi absorbante. Il est évident aussi que quand je vois disparaître à 21m de profondeur un disque blanc qui s'enfonce dans le lac, au moment où je vais cesser de le voir, il envoie encore à mon œil une quantité de lumière supérieure à la fraction 0.000 000 000 16 que me donne le calcul d'après le coefficient de Wild, soit à 16 cent milliardièmes de la lumière incidente. Si la lumière qu'il renvoie à mon œil était aussi faible, je ne saurais dis-

(1) *H. Wild*. Ueber die Lichtabsorption der Luft. Poggendorfs Annalen. Anhang CXXXIV, 582. Berlin, 1868.

(2) Le rayon lumineux qui revient à notre œil a fait un trajet double dans l'eau.

cerner avec précision la profondeur à laquelle il disparaît à la vue. Les différences d'évaluation de la limite de visibilité ne dépassent guère un mètre à cette profondeur. L'observation directe des faits de la nature me montre donc que les coefficients de transparence de M. Wild, tirés d'expériences faites avec de l'eau distillée, filtrée sur du papier grossier, sous des épaisseurs de 5 à 20^{cm}, ne sont pas immédiatement applicables sans certaines corrections importantes à la transmission de la lumière dans les couches épaisses de l'eau des lacs.

Nous avons vu que la cause principale du défaut de transparence de l'eau doit être cherchée dans des poussières en suspension dans cette eau. Je l'ai conclu des faits révélés par la recherche de la limite de visibilité. Voyons maintenant ce que sont ces poussières.

1° Il y a en premier lieu des corps de grande taille, disons un millimètre et plus, possédant la même densité que l'eau et flottant dans le liquide. Je ferai rentrer dans ce groupe :

a. Les cadavres et débris de cadavres animaux. Les tissus animaux sont en général plus denses que l'eau, mais ils peuvent être allégés par des corps gras ou par des gaz, et par conséquent flotter à la surface ou entre deux eaux.

b. Les végétaux et débris de végétaux. La cellulose et le protoplasme végétal sont plus denses que l'eau ; ils deviennent plus légers qu'elle lorsque les cellules contiennent des bulles de gaz.

c. En fait de matières minérales pouvant flotter dans l'eau [1], je ne connais dans notre lac que les scories bulleuses, produit de la combustion de la houille ; leurs cellules, pleines d'air, ne sont mouillées que petit à petit par l'eau ; on en voit parfois flotter à la surface ou entre deux eaux avant qu'elles s'alourdissent et coulent à pic au fond du lac.

2° Des corps de même nature que les précédents, mais de plus petite taille, réduits à l'état de poussière, de un millimètre et au-dessous, jusqu'à une fraction fort petite de millimètres, disons un centième ou un millième de millimètre. Leur masse étant beaucoup moindre que celle des corps de plus grande taille, ils se déplacent plus lentement pour la même différence de densité, et ils restent beaucoup plus longtemps en suspension dans l'eau.

[1] Des grains de sable, surtout s'ils sont enduits de corps gras, peuvent flotter sur l'eau, soutenus par le ménisque capillaire. J'en ai vu, entraînés en plein lac, formant, par leur agglomération, des radeaux de plusieurs centimètres de largeur. Mais ils ne peuvent flotter entre deux eaux.

3° Les poussières impalpables organiques et inorganiques qui peuvent être considérées comme n'ayant plus de masse vu leurs dimensions infiniment faibles, restent presque indéfiniment en suspension. Quelle que soit leur densité, leurs déplacements sont si lents qu'ils sont presque nuls. Nous avons dit (t. I, p. 108) qu'une eau salie par l'alluvion impalpable du lac ne se décharge de sa turbidité qu'avec une prodigieuse lenteur : en quatre jours, un bocal contenant de cette alluvion impalpable ne s'est clarifié que sur une épaisseur de 6.5^{cm}.

J'ai essayé de préciser la quantité de matière, sous forme de poussières impalpables, qui rend l'eau opaque et détermine la limite de visibilité aux diverses profondeurs. Pour cela j'ai commencé par rechercher le degré d'opacité qui arrête la vision dans le lac. J'ai pris des échantillons d'eau littorale salie par la vase mise en suspension dans les vagues, ou par le mélange avec l'eau trouble de la rivière la Morge grossie par les pluies ; après avoir mesuré la limite de visibilité dans le lac, j'ai versé mon échantillon dans un tube de Bunsen de 1^{m} de longueur, et j'ai constaté que, lorsque dans le lac la limite de visibilité était par 1.0^{m} de profondeur, dans le tube de Bunsen cette eau commençait à permettre la distinction de gros caractères d'imprimerie sur fond blanc (capitales normandes de 20^{mm} de hauteur, de 7^{mm} de largeur des pleins).

Cela étant, j'ai cherché quelle est la quantité d'argile du lac, réduite à l'état de poussière impalpable, qui donne la même limite de visibilité dans le tube de Bunsen. J'ai dilué progressivement, dans de l'eau purifiée au filtre Chamberland, quelques centigrammes soit d'argile des grands fonds du Léman, desséchée, porphyrisée et tamisée, soit de la même argile décantée pour n'y laisser que la partie impalpable, soit de la même argile à l'état humide pareillement décantée (c'est le procédé qui m'a donné les meilleurs résultats) : puis j'ai étudié ces eaux dans le tube de Bunsen, et j'ai constaté le degré de dilution qui fournit la visibilité correspondante à la limite de visibilité de 1^{m} dans le lac. Voici comme exemple l'une de ces expériences :

110^{cg} de limon humide des grands fonds, faisant 55^{cg} de limon sec, dilués dans 52 litres d'eau pure commencent à montrer, dans le tube de Bunsen de 1^{m}, les premières traces de lumière diffuse :

dilués dans 74 litres d'eau commencent à donner la vision nette des grosses lettres d'imprimerie. A ce moment la dilution est de 7 milligrammes par litre.

Mes diverses expériences donnent des valeurs oscillant de 7 à 15^{mg} par litre pour la quantité de poussière qui arrête la limite de visibilité à 1.0^{m} de profondeur. Si je prends le chiffre moyen de 10^{mg} par litre, je conclus que la quantité de matières minérales en suspension dans l'eau qui, agissant seule, détermine la limite de visibilité aux diverses profondeurs, est :

Limite de visibilité	1^{m}	Poussières en suspension	10^{mg}	par litre.
—	2	—	5	—
—	5	—	2	—
—	10	—	1	—
—	20	—	0.5	—

Si, au lieu des poussières minérales dont la densité est 2.6, nous prenions des poussières organiques beaucoup plus légères, ces chiffres, remarquablement faibles, devraient être encore sensiblement diminués, être divisés par 2 ou par 3.

La quantité de matières en suspension qui cause l'opalinité des eaux du lac est donc extrêmement faible. Elle est très inférieure en valeur à la quantité de matières en dissolution dans ces mêmes eaux, qui est de 175^{mg} par litre, comme nous le verrons plus tard.

Dans ce même genre d'étude, j'ai cherché quelle épaisseur de limon rend l'eau opaque. Voici le résultat d'une de ces expériences : 73^{cg} de limon sec dilués dans 1500^{g} d'eau donnent une opacité absolue sous une épaisseur de 26^{mm}. Si j'admets pour la densité de ce limon 2.6, cela représente une épaisseur de 0.004^{mm} de limon sec. Une couche de 4 millièmes de millimètre d'alluvion lacustre suffit donc, je ne dirai pas pour arrêter la lumière diffuse, mais pour empêcher de distinguer un corps éclairé.

Ces chiffres n'ont pas une rigueur absolue et varieraient avec la nature de l'alluvion. Mais ils sont intéressants en donnant une idée suffisante de l'ordre des grandeurs dans lesquels ils se meuvent.

Quelles que soient l'origine et la nature de ces poussières et corps figurés, ceux qui sont plus légers que l'eau viennent tôt ou tard flotter à la surface, ceux qui sont plus lourds descendent dans le fond. Ascension et descente se font d'autant plus vite que la différence de densité entre eux et l'eau ambiante est plus grande, et que la masse de chaque corps flottant est plus forte aussi ; les poussières impalpables restent longtemps, fort longtemps en suspension ; tôt ou tard cependant, les

unes et les autres finissent par monter ou par descendre. En revanche, les corps et les poussières grossières ou impalpables qui ont exactement la même densité que l'eau restent, eux, indéfiniment en suspension; ils flottent dans l'eau sans s'élever et sans descendre.

Quelles sont les causes de la plus grande turbidité des eaux d'été? Elles sont multiples.

1° Nous devons noter en premier lieu, sans vouloir dire par cela que ce soit la cause la plus puissante, le plus grand pouvoir absorbant de l'eau chaude. Quelques réserves que nous ayons faites sur la valeur du coefficient d'absorption tel qu'il a été déterminé par M. Wild, le fait est constant et indiscutable que l'eau chaude absorbe plus la lumière que l'eau froide.

2° Le plus grand développement de la vie organique dans les eaux chaudes de l'été que dans les eaux froides de l'hiver. Microzoaires, microphytes, microbes pullulent en plus grand nombre dans les eaux chaudes; c'est un fait d'expérience banale.

3° Les eaux d'été sont stratifiées thermiquement, celles d'hiver ne le sont pas. En été, il y a dans le lac des couches superposées passant de 4 ou 5° dans le fond à 24° à la surface, dont la densité varie, comme nous le verrons, de 1.0002 à 0.9976; en hiver, depuis la surface jusqu'au fond, les eaux ont la même température, par conséquent la même densité. Il en résulte qu'en été un beaucoup plus grand nombre de corps figurés de densités différentes et même assez divergentes, peuvent trouver une couche qui ait la même densité qu'eux-mêmes et doivent par suite flotter entre deux eaux.

Je me rappelle avoir vu un fragment de roseau rester en suspension à 30 centimètres sous l'eau, devant mon jardin à Morges, entre deux couches de densités l'une plus forte, l'autre plus faible que la sienne. Il y avait évidemment ce jour-là une stratification thermique très intense.

4° Pendant l'été les eaux de surface forment une couche bien nettement séparée et distincte des eaux moyennes sous-jacentes; ces eaux, toujours les mêmes, restent pour ainsi dire stagnantes et, ne se mélangeant pas avec la grande masse des eaux lacustres, gardent en suspension les poussières qui s'y accumulent. En automne et en hiver, au contraire, la convection thermique renouvelle sans cesse les eaux de surface qui disparaissent bientôt par leur chute dans la profondeur

et sont remplacées par les eaux plus propres des couches moyennes.

5° Au printemps et en été, les eaux des petits affluents, en dehors de l'état de crue, sont souvent plus légères que les eaux de surface du lac [1], et par conséquent restent superficielles. Or, quoique claires relativement aux eaux de débordement, ces eaux fluviatiles sont toujours bien moins limpides que les eaux lacustres. et elles tendent à diminuer la transparence de celles-ci avec lesquelles elles se mélangent.

6° Enfin les eaux lourdes d'un affluent en état de crue, les eaux limoneuses d'un ruisseau débordé, les eaux laiteuses du Rhône d'été sont, il est vrai, plus denses que les eaux de surface du lac et plongent en masse dans les grands fonds [2]. Mais si le lac est agité par des vagues, il y a mélange à l'embouchure de l'affluent de quelques parcelles de ces eaux sales avec les eaux claires du lac ; celles-ci se chargent de quelques particules d'alluvion impalpable : elles deviennent sales, troubles, louches ou simplement opalines. Nous venons de voir (page 428) qu'il suffit de quelques milligrammes par litre pour rendre opaque l'eau sous l'épaisseur de quelques mètres. Cette alluvion impalpable reste en suspension pendant longtemps, et durant des jours, des semaines même, peut altérer la limpidité des eaux. Un exemple entre mille : le 24 mai 1894, dans une excursion sur le lac, de Genève au Bouveret, après avoir admiré la transparence magnifique des eaux du Petit-lac, je reconnus le louche amené par les eaux de la Drance depuis Thonon jusqu'à Evian sur la côte de Savoie, par les eaux du Flon dans les environs d'Ouchy jusqu'au-delà de Pully, les eaux opalinisées par le Rhône et les bayes du Haut-lac à partir de Vevey. Tout le Haut-lac avait des eaux louches ou tout au moins opalines.

Ces masses d'eau salie par le trouble des rivières, entraînées par les courants superficiels, d'un vent sudois par exemple, forment devant l'embouchure des affluents en crue de vastes promontoires mobiles d'eau opaque ou opaline ; ils apparaissent, vus d'une colline élevée, comme de gigantesques panaches jaunâtres, grisâtres, verdâtres, qui s'étendent souvent fort loin, à bien des kilomètres sous le vent, et qui tranchent par leur couleur sur le bleu général du lac. Plus tard, lorsque le temps est revenu au calme, ces mêmes masses d'eau louchie sont

(1) Voyez t. I. p. 358.

(2) Voyez ma description de la Bataillière, t. I, p. 386.

promenées à la surface par le jeu des courants irréguliers et gardent pendant longtemps, des jours et parfois des semaines, leur individualité d'eau opaline, entourée par les eaux limpides du lac.

Cette action des eaux de rivière est à son maximum pour le Rhône pendant sa période de crue, de mai en août ; pour les petits affluents, lors de la fonte des neiges et après les grandes pluies. Elle est au contraire nulle pendant les gelées de l'hiver.

Je conclus : la variation périodique annuelle de la transparence des eaux est due à des causes multiples qui se combinent et s'additionnent. Ce n'est pas une action simple, c'est une action composée. Aussi la limpidité des eaux varie-t-elle beaucoup d'une observation à l'autre ; dans la même station, dans le même mois, on voit la limite de visibilité passer du simple au double. C'est ainsi que dans la station de Pully, par exemple, cette limite de visibilité a varié :

en juin,	de 3.5^m	à 7^m
en juillet,	4	7
en août,	4	10

Je trouverais des variations analogues dans toutes les stations du Grand-lac.

Les conditions les plus favorables à la limpidité des eaux sont celles des longues périodes de gelée d'un hiver soutenu. C'est alors que le lac a cette transparence admirable qui amène la limite de visibilité aux valeurs de 15, de 20, de 21^m, que nous avons indiquées comme étant jusqu'à présent le maximum observé.

C. Etudes et méthode de la Commission genevoise.

Le 4 octobre 1883, la Société de Physique de Genève nomma une commission chargée d'étudier la transparence des eaux du lac Léman, sous la présidence de J.-L. Soret. Ont pris part à ces travaux MM. J.-L. Soret, Ph. Plantamour, Ed. Sarasin, C. de Candolle, H. Fol, R. Pictet, Ch. Soret, A. Rilliet, Th. Turrettini et Schmidtgen. [1]

Outre la méthode du P. Secchi qui lui a donné les mêmes résultats

[1] Recherches sur la transparence des eaux du lac Léman, etc. Mém. soc. phys. XXIX, n° 11. Genève, 1887.

qu'à moi-même, cette commission a mis en œuvre une nouvelle méthode, que nous appellerons Méthode de la Commission genevoise. Elle consiste à chercher non pas la disparition à l'œil d'un corps éclairé par la lumière solaire, mais à déterminer la limite de disparition d'un corps éclairant plongé dans l'eau. Nos collègues se sont adressés pour cela à des bougies, à des lampes modérateur, à des lampes électriques, soit la lampe à incandescence Edison, soit la lampe à arc voltaïque.

Sans donner tous les détails des expériences, nous analyserons ici les résultats principaux de ces belles recherches, à quelques-unes desquelles j'ai été obligeamment invité à assister.

1° Tout d'abord il y a dans ces expériences à distinguer divers temps dans la disparition du corps éclairant. Une lumière plongée dans l'eau ne tarde pas à s'éteindre à l'œil comme si elle était dans un liquide lactescent ; son intensité diminue rapidement ; bientôt comme une flamme de gaz dans un brouillard, la lumière s'entoure d'une auréole, en devenant de moins en moins distincte. Elle n'est bientôt plus qu'une nébuleuse de plus en plus pâle avec une étoile centrale. Celle-ci enfin finit par disparaître et l'on note alors la *limite de la vision nette.*

Mais l'eau reste encore éclairée par une lumière diffuse : le miroir dirigé vers le corps lumineux reconnaît encore qu'il y a là de l'éclairage ; on discerne encore les extinctions et les illuminations de la lampe. Cette lumière diffuse devient de moins en moins distincte, jusqu'au moment où elle disparaît absolument et alors on note *la limite de la lumière diffuse.*

2° Des expériences comparatives ont montré que ces deux valeurs limites augmentent avec l'intensité de l'éclairage, mais sont loin d'être proportionnelles à cette intensité.

Ainsi, expérience du 18 juillet 1884 :

	VISION NETTE	LUMIÈRE DIFFUSE
Arc voltaïque	31.75^{m}	78.30^{m}
Lampe modérateur	24.30	41.30

3° Il y a très peu de différence pour la limite de visibilité entre les expériences où la lampe était portée horizontalement, sous la surface, et où la lumière était cherchée à l'aide d'un miroir incliné, et celles où la lampe descendait verticalement et où la lumière était cherchée

directement par l'œil. Les résultats de 36 expériences faites pour étudier ce facteur sont tantôt dans un sens tantôt dans l'autre.

4° La distance limite de visibilité est beaucoup plus considérable qu'avec la méthode du P. Secchi. Les chiffres maximaux obtenus par la commission genevoise dans les diverses expériences sont :

Date	Localité	Lumière	Verticalité ou horizontalité	Vision nette	Lumière diffuse
18 juillet 1884.	Rhône.	Lampe modérateur.	H.	24.30m	41.30m
15 mars 1886.	Plein lac.	Lampe Edison.	H.	39.75	50.90
id.	id.	id.	V.	36.71	59.85
18 juillet 1884.	Rhône.	Arc voltaïque.	H.	38.50	82.80
8 août 1885.	Plein lac.	id.	H.	34.56	87.98

Des expériences comparables ont été faites le même jour et dans les mêmes conditions avec les deux méthodes. Elles ont donné, le 15 mars 1886, entre Morges et Evian, en plein lac, comme chiffres maximaux :

Disque du P. Secchi	Limite de visibilité		18.30m
Lampe Edison, 7 bougies	—	vision nette	36.71
id. id.	—	lumière diffuse	59.85

5° Les expériences de la Commission genevoise n'ont pas été répétées assez souvent pour que je puisse y trouver la vérification de la loi de variation annuelle que j'ai constatée avec la méthode du P. Secchi.

6° Ces expériences n'ont pas amené un seul résultat contradictoire à l'hypothèse que la cause principale de la disparition d'un objet dans l'eau réside dans la formation d'un écran par les poussières aquatiques. Dans son rapport, rédigé par M. A. Rilliet, la Commission genevoise se prononce nettement pour cette explication.

D. *Limite d'obscurité absolue. Méthode photographique.*

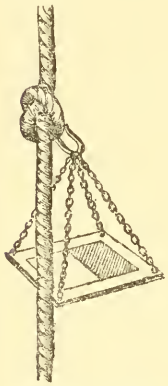
Une seconde méthode générale a servi à étudier la transparence des eaux du Léman. Tandis que dans l'étude de la limite de visibilité, nous cherchions à noter la distance à laquelle notre œil discernait encore un objet éclairé dans l'eau, dans la méthode photographique nous cherchons la limite à laquelle une substance photo-sensible cesse d'être affectée par les rayons solaires.

Les diverses substances photo-sensibles sont très différemment affectées par les rayons lumineux ; les unes sont plus sensibles que les autres. Nous aurons donc à déterminer *la limite d'obscurité absolue* pour chaque substance. Jusqu'à présent l'on n'a employé dans le lac Léman que deux substances : le chlorure d'argent et le bromo-iodure d'argent.

1° Chlorure d'argent.

Je passe rapidement sur mes premiers essais faits à Villeneuve, en avril 1873. Du chlorure d'argent précipité dans une bouteille, et descendu dans le lac à 60m de profondeur restait blanc après 24h d'exposition au jour. Il y avait déjà là indication d'une obscurité absolue ; mais la méthode était encore trop imparfaite. J'ai dû la perfectionner.

Je me suis adressé au papier albuminé et salé des photographes que je sensibilise en le plongeant pendant 10 minutes dans une solution de nitrate d'argent au 8 %, et que je laisse sécher dans l'obscurité. Pour expérimenter dans le lac, je coupe une de ces feuilles de 6cm de côté et je la place dans un appareil photographique. L'appareil (fig. 116), consiste en une plaque de verre de 12cm de côté attachée aux quatre angles par une chaînette de métal; sur la face supérieure, un cadre saillant dessiné par des bandes de verre, collées au vernis sur la plaque principale, reçoit la feuille de papier sensible. Celle-ci est recouverte et maintenue en place par une lame de verre blanc, dont une moitié, peinte en noir par un vernis opaque, fait écran; l'autre moitié laisse passer la lumière ; le contraste entre les deux moitiés permet d'apprécier l'action photo-chimique.



(Fig. 116.) Appareil photographique Forel.

Je vais ensuite chercher sur le lac un point de pose convenable, dont je fixe la position par des repères choisis sur le rivage ; j'attends le coucher du soleil, et quand l'obscurité est suffisante, je place la feuille de papier sensible dans l'appareil, j'attache celui-ci à une ligne de sonde et je la descends dans le lac à la profondeur convenable. Une bouée faisant flotteur me permettra de retrouver le tout en temps voulu.

Je laisse l'appareil dans le lac jusqu'à ce qu'un jour serein m'ait assuré une action parfaite des rayons solaires; puis je vais rechercher ma bouée à la chute du jour, j'attends la nuit, et je relève ma sonde

quand je suis sûr que la lumière n'affectera plus le papier sensible.

Je constate l'effet photographique et je fixe l'épreuve en la plongeant pendant 5 minutes dans un bain d'hyposulfite de soude au 15 %, en la lavant ensuite à grande eau et en la laissant sécher.

Suivant que je suis arrivé en deça ou au-delà de la limite d'obscurité absolue, le papier photographique me revient ou bien entièrement blanc, ou bien teinté de brun sur la moitié de sa surface non protégée par l'écran noir.

Il peut être utile d'apprécier l'intensité de cette action photographique ; c'est pour cela que je construis de la manière suivante une échelle d'intensité photographique. Je prends une feuille de papier sensibilisé et je l'expose, par segments successifs, à l'air libre, à un soleil brillant pendant des durées de plus en plus prolongées, chaque durée augmentée de 5 secondes sur celle du segment précédent.

Le n°	*1*	de mon échelle équivaut à	5	secondes d'exposition
	2	—	10	—
	3	—	15	—

et ainsi de suite. Je note la valeur de l'effet photographique par la durée de l'exposition au soleil qui produit une action analogue.

Par cette méthode, j'ai obtenu dans le lac Léman, devant Morges, en 1873-1874, les résultats suivants indiquant l'effet photographique d'après les numéros d'une échelle obtenue le 22 juillet 1873, à 11h du matin, par un beau soleil d'été.

	DATE		DURÉE	PROFONDEUR	EFFET PHOTOGRAPHIQUE Numéro de l'échelle	Secondes d'exposition à l'air libre au soleil
Eté.	23 juillet	1873	1 jour	2m	*100*	∞
	30 juin	—	2	27	*1.5*	7 sec
	11 juillet	—	3	40	*1*	5
	21 —	—	1	50	*0*	0
	25 juin	—	2	60	*0*	0
Hiver.	22 décembre	—	1	40	5	25
	23 —	—	2	50	7	35
	23 février	1874	1	50	*20*	100
	20 janvier	—	1	68	*0.6*	3
	15 février	—	1	80	*0.4*	2
	8 mars	—	4	93	*0.2*	1

J'ai séparé les expériences ci-dessus en deux séries, l'une pour l'été, l'autre pour l'hiver, et si j'appelle limite d'obscurité absolue pour le chlorure d'argent, la profondeur à laquelle les rayons solaires ne colorent plus ce sel, j'ai pu l'établir à environ 45^m pour l'été, environ 100^m pour l'hiver. J'avais donc ainsi la confirmation de mes observations sur la limite de visibilité qui attribuaient une plus grande transparence aux eaux d'hiver.

La comparaison entre les deux expériences du 23 décembre 1873 et du 23 février 1874, faites à la même profondeur, montre combien l'intensité d'action s'est augmentée d'une date à l'autre. Quant aux trois dernières expériences, par 68, 80 et 93^m, elles montrent toutes les trois que j'étais très près de la limite. Mais la décroissance d'effet photographique était-elle due à une plus grande limpidité de l'eau, ou bien signifiait-elle simplement que la décroissance d'effet était presque insensible près de cette limite d'obscurité absolue? Je ne pouvais donner de réponse assurée à cette interrogation.

La question était fort importante. En effet, je devais me demander s'il y aurait réellement une limite d'obscurité absolue? si la lumière pénétrant dans le lac ne diminuerait pas progressivement, mais sans devenir jamais nulle? si la courbe exprimant cette décroissance de l'éclairage ne serait pas une asymptote, c'est-à-dire qu'elle se rapprocherait sans cesse du point de zéro, mais sans l'atteindre jamais.[1]

Dans ces premières expériences, il y avait une cause d'irrégularité. Je laissais reposer mon appareil photographique sur le sol, et pour obtenir des profondeurs variant de 27^m à 93^m, j'avais cherché des points de pose très inégalement éloignés de la rive. Or, comme nous l'avons vu, la variation locale est souvent très importante.

Pour répondre à ces questions, pour corriger cette cause d'irrégularité, pour compléter nos connaissances sur la pénétration de la lumière dans le lac, j'ai cru devoir recommencer en 1887 une nouvelle série d'expériences. J'ai fait construire une dizaine d'appareils photographiques que j'ai attachés à la même ligne de sonde, à des intervalles de 10^m en 10^m, et j'ai renouvelé l'expérience chaque deux mois

[1] La décroissance de la transmission d'une radiation simple dans un milieu absorbant est exprimée par une exponentielle (H. Dufour).

d'une année entière, en l'opérant toujours au même point du lac, par 130m de profondeur, à 3.5kil en avant de Morges. (1)

Voici les résultats numériques de cette série d'expériences exprimés en durée en secondes d'exposition à l'air, d'après une échelle construite le 4 mars 1888, à midi, par un jour de grande limpidité de l'atmosphère.

Effet photographique dans le lac, en numéros de l'échelle du 4 mars 1888.

PROFONDEUR	8-9 Mars	11 Mai	5-7 Juillet	6 Septembre	9-12 Novembre	4-6 Mars
20m	— sec	— sec	400 sec	400 sec	500 sec	500 sec
25	—	400	—	—	—	—
30	—	—	60	250	400	500
35	—	250	—	—	—	—
40	—	—	voile	20	120	—
45	—	40	—	—	—	—
50	—	—	0	0	60	400
55	—	10	—		—	360
60	—	—	0	0	30	—
65	150	2	—	—	—	120
70	—	—	0	0	10	—
75	40	voile	—	—	—	60
80	—	—	0	—	voile	—
85	25	0	—	—	—	25
90	—	—	0	0	—	—
95	5	0	—	—	—	10
100	—	—		—	0	—
105	0	—	—	—	—	2
110	—	—	—	—	0	—
115	0	—	—	—	—	0

Pour ne pas trop surcharger mon tableau, j'ai groupé les résultats des expériences en profondeurs de 5 en 5 mètres. J'ai désigné par le mot voile les cas où l'effet photographique, encore appréciable à l'ins-

(1) Voici un ou deux détails du manuel opératoire qui peuvent être utiles. Les dix appareils suspendus de 10 en 10m à la ligne de sonde sont fort lourds ; pour les soutenir, il faudrait une trop grosse bouée qui, menacée d'être entraînée par les vagues et courants, demanderait un ancrage excessivement fort. Pour éviter cette surcharge, je fixe à la corde de la sonde un ou plusieurs ballons de verre soigneusement bouchés (le ballon de la lampe du cordonnier), en les attachant assez bas pour qu'ils soient noyés sous l'eau ; il en faut mettre assez pour que la corde soit tendue depuis le plomb d'ancrage jusqu'à ces flotteurs, afin d'assurer la verticalité de la chaîne d'appareils. Une bouée très légère qui doit échapper à la curiosité des bateaux de promenade ou de pêche m'aide à retrouver l'appareil, dont la position est du reste établie par l'entrecroisement d'alignements pris sur le rivage.

tant où je sortais l'appareil de l'eau, disparaissait ensuite sous l'action de l'hyposulfite de soude. J'ajoute, pour être complet, que les notes d'intensité ont été prises après l'action de l'hyposulfite de soude, aussi bien dans les épreuves d'expérience en plein lac que dans la gamme d'intensité, par conséquent elles sont comparables.

Ce tableau donne la courbe complète de la transparence de l'eau dans une année. Il n'y manque que l'observation de janvier 1888. Celle-ci a échoué, la bouée ayant été arrachée par les vagues d'une bise forte et prolongée ; je n'ai pu retrouver mes appareils, qui gisaient au fond de l'eau, que le 7 février. Cela ne m'empêche pas d'obtenir par interpolation la courbe annuelle.

J'en tire tout d'abord la limite d'obscurité absolue aux diverses saisons de l'année. Je la donne dans les chiffres ci-dessous en mettant en présence la profondeur limite de visibilité aux jours d'observation :

		Limite de visibilité	Limite d'obscurité absolue
8-9 mars	1887	15.6^{m}	100^{m}
11 mai	—	—	75
5-7 juillet	—	5.5	45
6 septembre	—	5.0	50
9-12 novembre	—	12.3	85
7 février	1888	18.0	—
4-6 mars	—	16.5	110

a. La limite d'obscurité absolue pour juillet reste à 45^{m} comme dans nos expériences antérieures ; pour mars elle est un peu approfondie et descend jusqu'à 110^{m} au lieu de 100^{m} ; dans les autres saisons, elle a des valeurs intermédiaires.

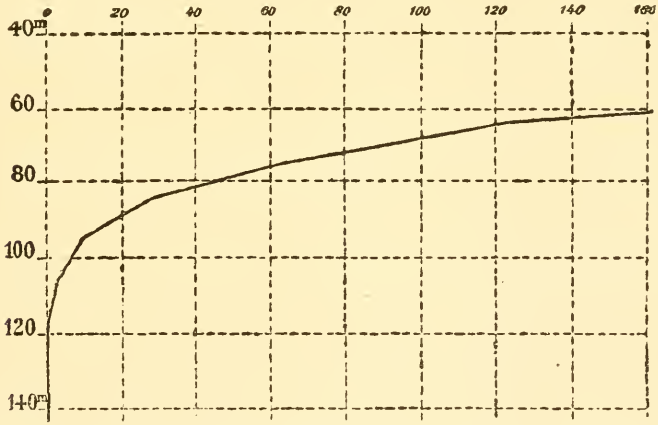
b. La courbe de l'obscurité absolue est sensiblement parallèle à celle de la visibilité. Or, comme la méthode d'évaluation de la première est beaucoup plus simple et plus pratique que celle de la seconde, pour étudier dans un lac quelconque la transparence de l'eau, et pour obtenir des résultats comparatifs d'un lac à l'autre, je conseillerai de s'en tenir à la détermination de la limite de visibilité d'après la méthode du Père Secchi.

c. Quant à la question de disparition de la lumière dans la profondeur, pour la juger je choisirai une de mes expériences, celle qui m'a fourni les chiffres les plus profonds et j'en donnerai les détails:

Du 4 au 6 mars 1888. Devant Morges.

Profondeur	Effet photogr. en secondes d'exp. à l'air
19.6m	500
25.2	500
45.5	400
55.5	360
65.6	120
75.6	60
85.7	25
95.8	10
105.4	2
115.6	0

Je vois dans ces chiffres une décroissance rapide. Jusqu'à 45m, l'action photographique est à son maximum ou à peu près, dans les 60m suivants elle diminue progressivement, elle est nulle 10m plus bas. Elle est nulle à 115m, et cela j'en suis bien assuré par la longueur du temps de pose : celle-ci a duré deux journées entières ; il est vrai que pendant ce temps le ciel n'a pas été constamment serein. Mais entre 11h et 13h, au moment où le soleil était le plus élevé, il y a eu de nom-



(Fig. 117.) Courbe de la pénétration de la lumière dans le lac (effet photographique) 5 mars 1888.

breuses trouées aux nuages et le soleil y brillait dans un ciel très pur.

Si je construis sur un graphique la courbe montrant la diminution de l'effet photographique (fig. 117), je vois qu'elle n'a aucunement les

allures d'une asymptote. Elle vient se terminer brusquement à la ligne de terre. Je suis parfaitement sûr que, au-delà de la limite d'obscurité absolue, le papier au chlorure d'argent est resté et restera parfaitement blanc. Ce qui me confirme dans cette assurance, ce sont les expériences de juillet et de septembre qui ont été faites par des jours de grand beau temps et dans lesquelles un grand nombre de feuilles sont restées absolument blanches.

Je conclus de cela que pour une substance photo-sensible comme le chlorure d'argent, il y a bien une limite d'obscurité absolue ; qu'il y a une profondeur au-delà de laquelle les rayons actiniques n'agissent plus.

Cette conclusion aura une grande importance pour l'étude des faits biologiques. (1)

2° Iodo-bromure d'argent.

On sait la très grande sensibilité à la lumière des composés iodo-bromurés d'argent ; ils sont beaucoup plus vite et beaucoup plus puissamment affectés que le chlorure d'argent. La lumière diffuse d'un ciel couvert, celle qui pénètre au fond d'une chambre, celle qui éclaire encore la nature après le coucher du soleil, laissent incolore le chlorure d'argent ; elles colorent promptement les plaques usitées actuellement dans l'art de la photographie et qui sont connues sous le nom de plaques au gélatino-bromure rapide de Monkhoven. Leur sensibilité est telle qu'une exposition pendant une minute à la lumière des étoiles produit une coloration appréciable.

Il était probable que pour cette substance photo-sensible, très délicate, les limites d'obscurité absolue seraient différentes et plus étendues que pour le chlorure d'argent.

(1) Par les mêmes méthodes, nous avons étudié la transparence des eaux du lac de Constance en 1889-1891. Les chiffres que nous avons trouvés pour ce lac indiquent une limpidité des eaux moins grande que dans le Léman. Je donne en présence les valeurs comparables de ces deux lacs : [loc. cit. p. 624].

		Bodan	Léman
Limite de visibilité moyenne		5.4^m	10.2^m
— maximale		12.	21.
Limite d'obscurité absolue pour le chlorure d'argent	été	30	45
	hiver	> 50	110

Les deux séries de recherches ont donné les mêmes résultats proportionnels dans les deux lacs.

Les premières expériences avec le iodo-bromure d'argent ont été faites par le Dr G. Asper, de Zurich, dans les lacs de Zurich et de Walenstadt (1). Ses résultats peuvent se résumer comme suit :

Dans le lac de Zurich, le 4 août 1881, des plaques descendues à 80 et 90m indiquaient une action photographique très marquée; le 10 octobre, à 90 et 100m la limite d'obscurité absolue n'était pas atteinte ; à 100m, l'effet photographique de toute une journée dans le lac était égal à celui de 5 heures d'exposition à l'air pendant la nuit du 2 nov. 1881, quatre jours avant la pleine lune avec de rares apparitions de cet astre.

Dans le lac de Walenstadt, le 3 octobre 1881, Asper a constaté une action lumineuse faible, mais encore évidente, sur des plaques descendues à 120 et 140m. Mais la décroissance de l'action photographique était telle qu'il conclut à la probabilité d'une obscurité absolue à 150 ou 160m ; à 140m, l'effet était égal à celui de l'exposition à l'air pendant toute une nuit claire sans lune.

Des recherches analogues, mais plus perfectionnées ont été faites dans le lac Léman par deux membres de la Commission genevoise, MM. H. Fol et Ed. Sarasin (2). Ces physiciens sont arrivés à opérer en plein jour, sans avoir recours à la nuit pour poser ou relever les plaques photographiques. Des appareils très ingénieux, superposés le long d'une corde, sont descendus fermés dans le lac ; ils s'ouvrent à l'instant où le plomb de sonde touche le fond et se referment automatiquement quand la ligne est relevée.

Voici le résumé des résultats obtenus par ces expériences, toutes faites en plein lac entre Evian, Morges et Ouchy.

L'effet photographique est dans quelques-unes comparé à celui d'une nuit sans lune pendant 5 ou 10 minutes.

16 août 1884.

b	113m	effet faible	supérieur à 10 minutes d'exposition à la lumière des étoiles.
a	237	— nul	
c	300	— nul	

(1) *G. Asper*. Actes, S. H. S. N. Aarau. Arch. Genève VI, 318, 1881. — Vierteljahresschrift der naturf. Ges. in Zurich, XVI, 382.

(2) *H. Fol* et *Ed. Sarasin*. Pénétration de la lumière du jour dans les eaux du lac de Genève, etc. Mém. Soc. phys. XXIX N° 13. Genève 1887.

23 septembre 1884.

g	90m	surexposition	
f	113	effet puissant	
d	147	— faible	supérieur à 10 minutes.
e	170	légèrement voilé	égal à 5 —

18 mars 1885.

k	158	effet très net	
l	192	— faible	inférieur à 10 minutes.
m	235	— nul	
n	245	— nul	
o	280	— nul	

Mars 1886.

240m impression faible mais cependant sensible (?)

De ces expériences, je tire les conclusions suivantes :

a. La limite d'obscurité absolue pour le iodo-bromure d'argent pendant 10 minutes d'exposition est à environ 200m de profondeur.

b. Si l'expérience de mars 1886 n'était pas indiquée comme douteuse, on pourrait chercher dans ces séries des variations saisonnières et trouver une limite un peu plus profonde en mars qu'en août et septembre.

c. La limite d'obscurité absolue pour le iodo-bromure d'argent est au moins deux fois plus profonde que pour le chlorure d'argent. (1)

Conclusions.

Des recherches ci-dessus analysées je conclus :

1° Dans le Léman la limite de visibilité d'un disque blanc éclairé par

(1) Avec les mêmes appareils, MM. Fol et Sarasin ont répété ces expériences dans la Méditerranée au large de Villefranche près Nice. Ils ont trouvé une limite d'obscurité absolue par 400m de profondeur. C'est à peu près le double de ce qu'ils avaient constaté dans le lac Léman.

Il est intéressant de voir que la même relation du simple au double se retrouve dans les deux séries d'expériences comparatives.

Limite de visibilité	Méditerranée	A. Secchi	42.5m
	Lac Léman	F.-A. Forel	21.
Limite d'obscurité absolue pour le iodo-bromure d'argent			
	Méditerranée	Fol et Sarasin	400m
	Lac Léman	—	200

la lumière du jour est à la profondeur de 21m (Forel et Delebecque, méthode du P. Secchi).

2° Dans le Léman la limite de vision nette d'un corps éclairant plongé dans l'eau est par 40m, la limite de la lumière diffuse est par 90m (méthode de la Commission genevoise).

3° Dans le Léman la limite d'obscurité absolue pour le chlorure d'argent est par 110m (Forel).

4° Dans le Léman la limite d'obscurité absolue pour le iodo-bromure d'argent est par 200 (240)m (Fol et Sarasin).

5° Il y a dans la transparence de l'eau une variation annuelle qui rend les eaux moins limpides en été qu'en hiver.

6° Il y a une variation régionale qui rend les eaux du Grand-lac et spécialement celles du Haut-lac, moins limpides que celles de Genève.

7° Les causes qui limitent la transparence des rayons lumineux à une distance aussi petite sont, pour une faible partie, l'absorption de la lumière par l'eau pure, pour une grande partie, la formation d'un écran opaque par la superposition optique des poussières en suspension dans l'eau.

8° Quant à la question de l'obscurité absolue ou non des régions abyssales du lac pour la rétine animale, je la renvoie après l'étude des faits biologiques, dans un autre volume de ce livre.

II. **L'ombre portée sur l'eau. Fantôme d'ombre et gloire.** (1)

Les corps directement éclairés par le soleil sont plus brillants que ceux qui ne reçoivent que la lumière diffuse réfléchie par l'atmosphère et les objets environnants. Lorsqu'un corps opaque fait écran sur une surface, il cache derrière lui un cône mal éclairé qui porte le nom de cône d'ombre. Comment le cône d'ombre se produit-il sur l'eau, et quels sont ses caractères ?

Le phénomène de l'ombre se produit sur les corps demi-transparents d'une manière toute spéciale et fort différente de la manière dont il a lieu sur les corps opaques. Tandis que sur les corps parfaitement transparents, comme l'air et l'eau physiquement purs, l'ombre est

(1) Bull. S. V. S. N. XIII, 357, Lausanne, 1874.

absolument imperceptible, tandis que sur les corps opaques l'ombre se traduit par une différence d'éclairage de la surface et, par suite, par une différence de couleur et de ton de la surface seulement, dans les corps demi-transparents, comme l'air chargé de poussières ou de vésicules de brouillard, ou bien l'eau telle qu'on la rencontre dans la nature, le phénomène de l'ombre se traduit par une différence de couleur et de ton de la masse même du corps opalin. Les poussières de l'air [1], les poussières de l'eau, illuminées par le soleil, apparaissent plus brillantes que lorsqu'elles ne reçoivent pas cet éclairage, et, ensuite de cela, l'eau traversée par un rayon de soleil apparaît plus éclatante, d'une autre couleur que l'eau protégée par un écran. Il en résulte que le cône d'ombre projeté dans l'eau par un corps opaque montre une teinte plus sombre, plus foncée que la partie de l'eau avoisinante éclairée par les rayons du soleil (par exemple, l'ombre d'un nuage qui passe sur le lac) ; il en résulte aussi que si un artifice quelconque, une lentille convergente par exemple, concentre en un point une somme plus forte de rayons solaires, ce point apparaîtra plus brillant, plus éclatant, plus lumineux que les régions avoisinantes.

Mais ces différences d'éclairage ne deviennent sensibles à notre œil que lorsque l'épaisseur de la couche d'eau éclairée ou ombrée est suffisante pour impresionner la rétine par voie de différence ; l'expérience suivante le fera comprendre : Prenez un petit fragment de miroir plan, une lame d'un centimètre de large sur quelques centimètres de long ; placez-le dans le lac, sous une couche de quelques décimètres d'eau, la face réfléchissante tournée en haut. Les rayons solaires, réfléchis par la surface brillante, formeront une traînée lumineuse suivant laquelle les poussières illuminables de l'eau recevront une somme double de lumière : les rayons directs du soleil et les rayons réfléchis par le miroir. Cette traînée, ce plan lumineux, apparaîtra brillant à l'observateur ; mais celui-ci ne le verra, il ne percevra la différence d'éclairage entre la traînée lumineuse et l'eau avoisinante, que lorsqu'il sera placé de telle sorte que son rayon visuel pénètre suivant une longueur suffisante dans le plan éclairé. Tant que son rayon visuel formera un angle droit ou presque droit avec le plan lumineux, il ne percevra rien ; il ne commencera à le discerner que

[1] Dans une chambre éclairée par la fente de contrevents entrebaillés.

lorsque son rayon visuel sera presque parallèle, et ne le verra bien que lorsqu'il se confondra presque avec la traînée lumineuse, lorsqu'il l'enfilera, pour employer le langage des artilleurs. Il en serait de même de l'ombre portée par un corps opaque assez étroit, un bâton, une rame, par exemple.

En fait, nous ne percevons les différences d'ombre et de lumière dans l'eau que lorsque notre rayon visuel est contenu, ou à peu de chose près, dans les cônes d'ombre ou de lumière ; dans ce cas, nous percevons la différence d'éclairage des couches de l'eau. Nous distinguons fort bien l'ombre portée sur l'eau par notre propre corps, car nos yeux étant situés au centre du cône d'ombre formé par notre tête, notre rayon visuel est intégralement contenu dans ce cône d'ombre. Mais nous ne voyons pas, ou nous voyons à peine, l'ombre de personnes assises dans le même bateau, si elles sont à quelques mètres de nous; nos yeux ne sont aucunement en relation avec les cônes d'ombre formés par ces personnes. Notre rayon visuel traverse leurs cônes d'ombre suivant des angles relativement assez ouverts ; il en résulte que, même lorsque nous sommes en compagnie, nous voyons notre ombre isolée et solitaire sur l'ombre de notre bateau. Comme le Peter Schlemihl de Chamisso, nos voisins ont perdu leur ombre.

C'est un phénomène analogue à celui qui se produit au sommet d'une montagne, dans l'ombre de l'observateur portée sur une masse de brouillards, et qui est connu sous le nom de spectre du Brocken. Sur le Brocken, les corpuscules diversement illuminés sont les vésicules peu serrées d'un nuage rapproché ; sur le Léman, ce sont les fines poussières qui opalinisent à peine l'eau bleue de notre lac. Je devrais donc désigner l'apparition sous le nom de spectre. Mais le mot spectre a dans la langue moderne une signification si précise et si fréquemment employée dans les phénomènes de dispersion chromatique que, pour éviter toute confusion, je préfère appeler le phénomène qui nous occupe le fantôme d'ombre portée sur l'eau, ou plus brièvement le *fantôme d'ombre*.

Mais cette ombre sur l'eau ne se voit bien avec les caractères que je viens de décrire que dans la région profonde du lac, à l'eau bleue ; sur les bords, partout où l'on voit le fond, l'ombre portée des corps opaques se dessine sur le sol, surface opaque elle-même, suivant les lois normales et bien connues de l'ombre portée, et cette ombre, bien plus

intense et bien plus distincte, masque et éteint l'ombre diaphane et légère, l'ombre à peine sensible due à la différence d'illumination des poussières de l'eau. Le phénomène du fantôme d'ombre ne se produit donc pas dans une eau peu profonde, à moins qu'elle ne soit assez opaque pour masquer absolument le fond. Dans ces conditions de non transparence de l'eau, j'ai vu le fantôme, même dans la région de la beine; mais alors le phénomène tend à se rapprocher de l'ombre portée sur les corps opaques et n'a pas l'éclat et le charme qu'il présente sur l'eau bleue dans les belles journées de l'hiver et du printemps. Si l'on me demande des chiffres, je dirai que le fantôme d'ombre est encore visible sur le lac lorsque l'eau est assez transparente pour permettre de voir le fond sous trois mètres d'épaisseur; au contraire, lorsque le fond est invisible sous une couche d'un mètre d'eau, l'ombre portée à la surface de ce liquide presque opaque est tellement visible, que l'illumination de l'eau elle-même n'apparaît qu'en sous-ordre et accessoirement.

Or l'ombre de l'observateur, portée sur l'eau profonde et très faiblement opaline du lac, le fantôme d'ombre présente cela de particulier d'être entouré le plus souvent d'une *gloire* très brillante.

On appelle, en physique, gloire, un phénomène optique consistant en une auréole brillante qui entoure en certains cas spéciaux l'ombre de l'observateur. L'on a signalé, à ma connaissance, des gloires apparaissant dans les circonstances suivantes :

1° L'observateur tourne le dos à un soleil brillant sur un sol herbeux, sur un terrain labouré ou rocailleux; il voit son ombre, et en particulier l'ombre de sa tête, entourée d'une zone brillante, plus éclatante que le reste du terrain. Winterfeld en a donné, en 1795, l'explication suivante : Si l'on se représente tout le firmament parsemé de lunes, l'on comprendra facilement que la région du ciel la plus brillante, la plus brillamment illuminée, serait celle qui entourerait l'ombre de la terre. Dans cette région, toutes les lunes seraient à l'état de pleines lunes; dans les autres régions du ciel, elles ne seraient qu'à l'état de quartiers ou de nouvelles lunes. Il en est de même des herbes, des grains de sable, des cailloux, qui, pour notre œil, sont d'autant plus brillamment éclairés et nous montrent une plus faible partie de leur face ombrée qu'ils sont plus près de la région anthétique ou de l'ombre de notre tête.

2° L'observateur regarde une prairie couverte de rosée exposée au

soleil levant ; l'ombre de sa tête est entourée d'une auréole souvent très éclatante, tantôt de reflets nacrés répandus à la surface des feuilles, tantôt d'étincelles fixes et isolées. M. Lommel explique cette gloire en l'attribuant à la réflexion totale de la lumière du soleil au travers de la goutte sphérique de rosée sur la face opaque de la feuille qui la porte, sans être mouillée par elle. (1)

Dans ces deux cas, la gloire est due à un phénomène relativement simple de réflexion ; la variété de gloire que j'ai à décrire a sa cause dans des phénomènes assez compliqués, et la théorie de sa production nécessitera quelques développements.

Cette gloire entoure d'une auréole brillante l'ombre de la tête de l'observateur lorsque cette ombre est portée sur l'eau. L'auréole est formée de rayons divergents partant d'un centre au milieu de l'ombre de la tête, rayons alternativement plus brillants et plus sombres que la teinte générale de l'eau, rayons fort inégaux dans leur longueur, ne venant pas nécessairement toucher le bord de l'ombre, rayons fort inconstants, apparaissant et disparaissant instantanément, se déplaçant sans cesse, ne se fixant jamais. Ces rayons ne sont pas absolument rectilignes ; ils sont plutôt légèrement ondulés. Ils ne convergent pas parfaitement vers un même centre ; leur convergence est plutôt une direction générale vers l'ombre de la tête plutôt qu'une figure absolument géométrique. L'auréole devient visible lorsque l'ombre est portée sur une eau assez profonde ou assez opaline pour que l'œil ne distingue plus le fond lorsque cette eau est agitée par des vagues : le phénomène est d'autant plus brillant que le soleil est plus resplendissant et plus haut sur l'horizon, que la surface de l'eau est agitée par des vagues plus entre-croisées, plus petites et plus nombreuses, que l'eau enfin, sans être opaque, est plus louche, est plus opaline.

C'est sur le lac Léman que j'ai étudié cette gloire, dans la région profonde connue sous le nom d'eau bleue, là où l'œil ne voit plus le fond, ou sur les bords lorsque l'eau était assez sale pour masquer absolument le sol. Ce phénomène s'observera sur toute eau où les conditions de sa production seront remplies.

Cherchons l'origine de ces rayons lumineux divergeant autour de la

(1) Cf. *Lommel* : Ueber den Lichtschein um den Schatten des Kopfes. Poggendorff's Jubelband, p. 10 sq. Leipzig, 1874.

tête du fantôme d'ombre, et établissons pour cela les conditions dans lesquelles la gloire apparaît.

1° Ces rayons n'apparaissent que lorsque la surface de l'eau est agitée, et correspondent d'une manière évidente à la forme et à la direction des vagues. Quand le lac est plat comme un miroir, on n'en voit point; ils apparaissent à l'instant où la rame fait frémir la surface de l'eau. — Quand les vagues sont mortes et larges, les rayons sont plus larges, et plus brillants aussi, que lorsque les vagues sont étroites et vives; — quand les lames sont guillochées par des rides, les rayons sont en nombre considérable : l'œil ne peut les compter; — quand le lac est agité de vagues parallèles, régulières, les rayons parallèles aux arêtes des vagues apparaissent seuls, et la gloire est incomplète suivant les autres directions. — La gloire n'est complète, elle n'est formée de rayons divergeant dans tous les sens autour de la tête, que lorsque la surface de l'eau est sillonnée par des vagues qui s'entrecroisent dans toutes les directions. Les rayons de cette gloire sont donc liés à l'existence, à la direction et à la forme des vagues.

2° Lorsque, par un jour de soleil, je regarde le fond du lac, là où il est profond de un à deux mètres, si la surface est agitée par des vagues et surtout par des vagues mortes, je vois se dessiner sur le fond des lignes brillantes, parallèles, marchant comme les vagues, et liées évidemment, leurs allures le démontrent, à l'existence des vagues. Ces lignes brillantes sont dues à la convergence des rayons solaires réfractés par la surface convexe des sommets des vagues; ce sont des lignes de foyer. Les creux des vagues, surfaces concaves, sont au contraire des surfaces divergentes, et les bandes qui leur correspondent entre les lignes brillantes sont plus obscures, plus sombres, moins éclairées que ne le serait le sol sous un lac immobile, étant donnés la profondeur et la transparence de l'eau et l'éclat du soleil.

3° Ces bandes, alternativement brillantes et obscures, qui se dessinent ainsi sur le fond du lac, correspondent à des couches inégalement illuminées de l'eau : ces couches n'existent pas seulement sur le fond lui-même, mais traversent toute l'épaisseur de l'eau. En effet, si l'on descend dans l'eau une plaque opaque étendue horizontalement, on voit se dessiner à la face supérieure de cette plaque les mêmes bandes claires et obscures, plus ou moins diffuses, à toutes les profondeurs intermédiaires entre la surface et une profondeur limite qui des-

cend parfois à quatre ou cinq mètres. Ces couches, formées par les rayons solaires, et prenant en conséquence leur origine au soleil, sont limitées par des surfaces plus ou moins planes, correspondant à peu de chose près à des plans. Ces surfaces planes sont parallèles à la crête des vagues, et elles se déplacent avec celles-ci. Leur direction est donc déterminée par la position du soleil d'une part, et par l'orientation des vagues d'une autre part.

Nous pouvons donc considérer l'eau comme traversée, suivant ces plans, par des couches parallèles alternativement brillantes et sombres, que nous désignerons par le nom de plans ou couches d'illumination, comprenant des couches illuminées et des couches ombrées.

4° D'après ce que nous avons dit plus haut, ces couches d'illumination ne deviendront distinctes à notre œil que lorsque le rayon visuel les coupera suivant une longueur suffisante ; disons : lorsque le rayon visuel sera compris dans les couches elles-mêmes.

5° Les couches diversement éclairées ne devenant visibles que lorsque le rayon visuel peut les enfiler en étant contenu dans leur intérieur, il en résulte que nous ne distinguerons que celles de ces couches dont la position sera telle qu'elles feront partie d'une surface conique dont le sommet serait au centre optique de l'œil.

6° Appelons axe de l'ombre la ligne droite venant du soleil et passant au centre optique de notre œil ; elle aboutit dans le lac au centre de la tête de notre ombre, ou de l'ombre de notre tête. Les plans d'illumination de l'eau qui sont, par leur production, dans la direction des rayons solaires, ou bien sont parallèles à l'axe de l'ombre ou bien passent par cet axe. Pour qu'ils soient discernés et séparés par la vue, ils doivent faire partie d'une surface conique dont le sommet est au centre optique de notre œil. Si nous cherchons les cas où cette condition peut être remplie, nous arrivons à éliminer tous les plans d'illumination parallèles à l'axe de l'ombre, pour ne retenir que ceux qui passent par cet axe.

Nous distinguerons donc et séparerons facilement à la vue tous les plans d'illumination de l'eau compris dans une surface de révolution pivotant autour de l'axe de notre ombre.

Ces plans sont coupés par la surface de l'eau qui forme un plan plus ou moins oblique aux rayons solaires suivant la hauteur de l'astre ; les plans d'illumination discernables par notre vue dessinent sur la sur-

face de l'eau des rayons convergeant autour du centre de l'ombre de notre tête. La surface du lac représente pour notre vue un plan relativement net et tranché; nous y rapportons instinctivement les apparitions peu précises qui nous viennent de la masse profonde de l'eau. Nous attribuons donc aux plans d'illumination que nous discernons dans la profondeur du lac la forme de rayons lumineux jouant dans les couches supérieures de l'eau, rayons d'un cercle dont le centre serait au milieu de l'ombre de notre tête.

La gloire qui entoure le fantôme d'ombre porté sur l'eau est ainsi formée par ces rayons, qui sont la trace des plans d'illumination dus aux vagues superficielles de l'eau. On pourrait la désigner sous le nom de gloire anthélique aquatique.

7° Il y a cependant moyen de voir une gloire qui n'est pas anthélique, qui n'entoure pas la tête de notre fantôme d'ombre. Si je tiens à la main un miroir plan, et si, l'écartant de mon corps, je cherche sur cette glace l'image de l'ombre de ma tête, je vois celle-ci dépourvue de sa gloire; au contraire, l'image de l'ombre de ma main paraît entourée d'une auréole de rayons convergents.

8° Nous avons raisonné jusqu'ici dans la supposition que le plan d'illumination ne devient apparent que lorsqu'il est enfilé par le rayon visuel, lorsque le rayon visuel est compris entièrement dans le plan d'illumination. En réalité, il apparaît déjà lorsque le rayon visuel, sans l'enfiler absolument, lui est presque parallèle. Il en résulte que nous discernons déjà les plans d'illumination, alors même qu'ils ne passent pas absolument par l'axe optique parallèle aux rayons solaires, mais s'ils en sont très rapprochés; il en résulte que les lignes brillantes qu'ils traceront dans l'eau ne seront pas toujours des droites, des rayons convergeant absolument et géométriquement vers le même centre. Il en résulte qu'il y aura une certaine latitude dans la rigidité de cette convergence et dans la rectitude des rayons de l'auréole.

9° Si les vagues étaient géométriquement parallèles, les plans d'illumination le seraient aussi, et nous ne verrions en fait de rayons à notre gloire que deux droites, les deux moitiés du diamètre parallèle à la crête des vagues. Mais le parallélisme absolu n'est pas dans la nature des ondulations de l'eau et, même lorsque les rides sont les plus régulières, nous voyons toujours quelques rayons divergents autour du diamètre dont nous venons de parler. On comprend que ces rayons formeront une gloire d'autant plus régulièrement distribuée autour de

la tête que les vagues s'entre-croiseront dans des directions plus compliquées et plus diverses. Le ressac des vagues qui viennent heurter contre les flancs du bateau suffit, même lorsque les vagues sont le plus parallèles, pour les faire s'entre-croiser de telle sorte que la gloire apparaît dans toute sa beauté.

10° Comme ces rayons sont le résultat de différences d'illumination dans l'eau, les plans éclairés seront d'autant plus brillants, les plans ombrés d'autant plus sombres que les rayons solaires seront plus entièrement réunis ou dispersés ; la gloire sera donc formée de lignes d'autant plus éclatantes que les vagues seront plus convexes, plus mortes, que leurs crêtes formeront des arêtes mousses et arrondies.

11° Les rayons de cette gloire étant dus à des différences très faibles d'illumination des couches de l'eau, leur éclat est très peu intense. De même donc que l'ombre portée sur l'eau, dont nous avons parlé plus haut, ils ne se voient pas lorsque le fond de l'eau éclairé apparaît à l'œil, et ils ne deviennent visibles qu'à l'eau bleue, là où la teinte sombre des couches profondes du lac permet de distinguer les plus faibles nuances de ton et d'éclairage de la surface. Ils apparaîtront encore dans une eau peu profonde, lorsque l'eau est assez louche pour masquer les détails du fond.

Si l'eau est assez opaque pour laisser voir à sa surface l'ombre portée, les couches profondes de l'eau ne peuvent pas s'illuminer et la gloire n'apparaît plus. (1)

12° Lorsque le soleil s'abaisse sur l'horizon, la quantité de ses rayons réfléchis par la surface de l'eau augmente par rapport au nombre de ceux qui sont réfractés ; il en résulte que les lignes alternativement brillantes et ombrées de la gloire apparaissent avec d'autant

(1) Des rayons parallèles qui semblent faire partie de l'auréole d'une gloire apparaissent très nettement dans l'eau troublée par les palettes du bateau à vapeur quand il bat en arrière à l'arrivée au débarcadère, ou dans les vagues qui brisent sur une plage fangeuse. La vase soulevée par l'agitation violente de l'eau renferme des poussières de grosses dimensions qui forment chacune un cône d'ombre ; alors même que le rayon visuel ne pénètre pas bien loin dans ce nuage opaque, il en voit assez pour suivre facilement et nettement la direction de ces lignes obscures. Mais ces lignes obscures, cônes d'ombre de poussières aquatiques, ne sont pas des plans ; elles sont parallèles les unes aux autres, ou si l'on veut, elles convergent dans la direction du soleil et non dans celle de l'anthélie ; elles ne peuvent donc pas former une gloire autour de l'ombre de la tête du spectateur. Il y a donc lieu de les séparer très nettement des lignes de brillantes illuminations, des rayons qui forment la gloire anthélique.

plus d'éclat que le soleil est plus haut sur l'horizon, et qu'elles disparaissent absolument [1] lorsqu'il est très bas. Du reste, la même loi s'appliquant à tous les rayons lumineux, le phénomène de l'ombre portée sur l'eau transparente est soumis aux mêmes conditions et ne peut s'observer que lorsque le soleil est à une certaine hauteur.

13° Il est un cas où le phénomène de la gloire n'est pas apparent, alors même que toutes les conditions favorables à sa production sont représentées. C'est lorsque l'observateur est placé sur un bateau à vapeur en marche. Si la vitesse du navire est assez forte, les lignes rayonnantes, alternativement éclairées et ombrées de la gloire, se confondent comme les rayons d'une roue de char blanche qui tourne rapidement devant l'œil ; ils n'ont pas le temps de faire image sur la rétine. L'observateur attentif ne peut alors discerner que quelques-uns des rayons de sa gloire, ceux qui sont parallèles à la ligne de marche du bateau.

Il en est de même lorsque je rame dans ma péniche, dont la marche est assez rapide. Pendant le premier temps du mouvement de la rame, (je rame assis, en regardant l'arrière du bateau), alors que je me penche en arrière en appuyant sur la rame, et que j'augmente encore par ce déplacement la vitesse de progression de ma tête, et par suite la vitesse de la translation de mon ombre sur l'eau, je ne vois plus les rayons de la gloire autour de l'ombre de ma tête ; je les distingue au contraire fort bien dans le second temps du mouvement de la rame, quand mon corps se penchant rapidement pour ramener la rame en avant, mon ombre reste pour un instant immobile par rapport à la surface de l'eau.

14° Enfin la contre-épreuve du phénomène de la gloire, ou, si l'on veut, une gloire négative, est donnée dans le cas suivant : l'ombre d'un arbre portée sur l'eau profonde paraît composée de rayons sombres convergeant autour de l'ombre de la tête de l'observateur, lorsque celui-ci est placé dans le cône d'ombre formé par l'arbre ; ces rayons se déplacent dans la même direction et de la même manière que progresse l'ombre de l'observateur.

C'est sur le quai neuf d'Evian, là où les jeunes platanes, à feuillage

[1] Autour de l'ombre de la tête du moins, car l'observateur peut les retrouver encore au-dessous de lui, ou même entre lui et le soleil, sous la forme de grands rayons presque parallèles et dont le centre doit s'aller chercher bien loin, là où serait l'ombre de sa tête, si l'ombre pouvait se produire.

peu serré, portaient sur une eau profonde leur ombre entrecoupée de parties éclairées, que j'ai observé pour la première fois, en juin 1874, cette ombre singulière, dont l'explication est analogue à celle que j'ai donnée de la gloire lumineuse décrite plus haut.

— Ces divers détails du phénomène coïncidant avec la théorie, et la théorie rendant parfaitement compte des faits, nous croyons avoir ainsi donné l'explication de l'apparition qui nous occupe et nous conclurons :

a. La gloire que nous voyons autour de l'ombre de notre tête, lorsque cette ombre est portée sur l'eau profonde d'un lac, est due aux différences d'illumination des couches d'eau. Les couches d'eau sont différemment illuminées suivant qu'elles correspondent aux surfaces convexes (convergentes) ou concaves (divergentes) des vagues.

b. La production de cette gloire est une démonstration de la faculté d'illumination de l'eau en raison des poussières qu'elle renferme. De l'eau physiquement pure ne fournirait ni ombre ni gloire ; un liquide absolument opaque, de l'encre ou du mercure, offrirait une ombre portée à sa surface, mais point de gloire.

III. Spectre de dispersion chromatique dans l'eau.

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que les surfaces courbes des vagues produisent par réfraction sur les rayons solaires des déviations qui tantôt rapprochent ces rayons, tantôt les séparent ; la surface convexe du dos de la vague agit comme une lentille convergente et accumule la lumière dans une couche plus illuminée ; la surface concave du creux de la vague forme lentille divergente, et la couche d'eau qui en dépend est moins éclairée ou plus sombre.

Les vagues ont des surfaces cylindroïdes allongées ; le foyer de ces lentilles convergentes est donc une ligne qui se dessine en un trait brillant sur tout écran opaque étendu dans l'eau à une profondeur convenable. La profondeur convenable variera du reste avec la forme de la vague et la hauteur du soleil ; plus la vague sera mousse et aplatie, plus la distance focale sera grande ; plus le soleil sera haut sur l'horizon, plus la profondeur du foyer s'éloignera de la surface de l'eau. C'est ce que nous voyons fort bien sur la terrasse littorale immergée de

la beine. Lorsque l'eau est limpide, que le soleil brille au firmament, et que la surface du lac est soulevée en vagues mortes, l'on voit se dessiner sur le fond de l'eau des lignes brillantes qui courent avec les vagues et représentent les lignes focales des surfaces cylindroïdes de réfraction. Lorsque la profondeur de l'eau est plus grande ou moins grande que la distance focale, ces lignes se changent en bandes d'autant moins brillantes qu'elles sont plus larges, ce qui veut dire que l'écran est plus éloigné du point focal moyen.

Ces lignes brillantes cheminent avec les vagues ; elles se déplacent donc assez vite. Leur mobilité apparente est augmentée et compliquée par les réfractions différentes subies à sa sortie de l'eau, alternativement sur les faces opposées des vagues, par le rayon lumineux qui les apporte à l'œil. Ce rayon traverse tantôt la face de la vague inclinée vers l'observateur, tantôt la face opposée qui se relève en sens inverse ; tantôt il est peu réfracté, tantôt il l'est beaucoup. L'image de la ligne d'illumination, comme du reste l'image de tout corps plongé sous l'eau, subit de ce fait des déplacements continuels, un sautillement dans le plan visuel perpendiculaire à l'arête des vagues.

Pour supprimer ces déplacements dus à la réfraction sur les faces des vagues, on n'a qu'à se servir de la lunette à eau décrite à la page 2 du tome Ier.

Ce sautillement de l'image, combiné avec la progression normale de la ligne d'illumination qui marche avec la vague, donne à l'apparition un aspect mouvementé très spécial.

Le cas où ces foyers d'illumination donnent les images les plus belles est peut-être celui d'une vague latérale de refoulement d'un bateau à vapeur marchant à grande vitesse sur la beine, si le lac est absolument calme et le soleil brillant. On voit alors au milieu de la vague, à surface unie avant qu'elle se brise et se recourbe en volute, comme un voile de gaze aux reflets d'aigue-marine, d'un éclat fort doux et d'un effet saisissant. J'ai admiré entr'autres ce phénomène près du port de débarquement de St-Sulpice et sur le banc du Travers à Genève.

En même temps que les rayons solaires sont réfractés et concentrés sur ces lignes d'illumination, ils subissent une dispersion chromatique, et la lumière blanche est décomposée en ses parties élémentaires. Les lignes d'illumination présentent sur leurs bords les couleurs du

spectre de dispersion, et cela de telle manière que si l'on considère la projection du soleil à l'horizon comme le centre d'un cercle d'où partent les rayons solaires, le rouge du spectre, soit les rayons les moins réfrangibles, est en dehors, le bleu, soit les rayons les plus réfrangibles, est en dedans ; le rouge est sur le bord de l'image le plus rapproché du spectateur qui a le soleil devant lui.

Ces petits arcs-en-ciel aquatiques, si j'ose m'exprimer ainsi, présentent du reste les mêmes mouvements de progression et de sautillement que les lignes d'illumination, et ils donnent, quand ils sont bien développés, les jeux de lumière les plus gracieux et les plus délicats. (1)

Ces spectres de dispersion chromatique sont d'autant plus éclatants que le soleil est plus brillant et l'eau plus limpide. Je ne les ai vus nulle part aussi joyeusement colorés que dans l'eau admirablement transparente du lac Lucel (vallée d'Arolla), éclairée par la lumière intense des hautes régions de l'atmosphère (2) ; ils étaient bien beaux aussi en avril 1888, dans les piscines de Sidi Meçid, à Constantine, où le soleil d'Algérie se jouait dans les eaux d'une pureté cristalline.

Dans notre lac Léman, il est rare qu'on puisse les observer. Mais ils y sont aussi brillants qu'ailleurs lorsque le spectateur rencontre la réunion des conditions favorables, à savoir : grand éclat du soleil, élévation suffisante de l'astre sur l'horizon, grande limpidité de l'eau, vagues de forme convenable, profondeur de l'eau correspondant à la distance focale de la surface des vagues. J'ai dans mes notes de nombreuses observations du phénomène ; il serait oiseux de les énumérer ici.

La théorie de ces spectres de dispersion est bien simple.

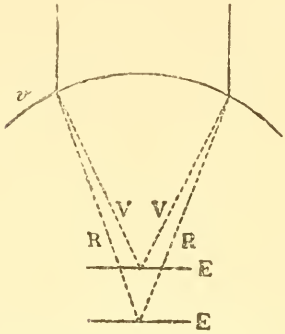
Les rayons diversement colorés de la lumière blanche sont différemment réfrangibles ; en traversant un plan ou une surface réfractante, ils sont donc déviés suivant des angles différents ; il y a aberration de réfrangibilité.

Si le soleil est au zénith, en frappant sur la surface cylindroïde d'une vague, *V*, les rayons sont dispersés chromatiquement ; l'image portée sur un écran opaque, *E*, sera colorée différemment suivant la

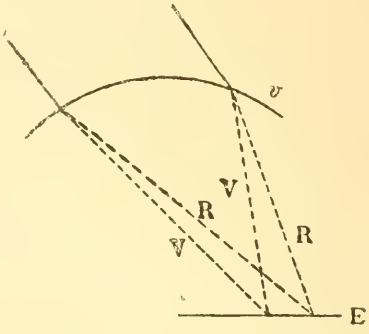
(1) Pour étudier plus facilement ces apparitions colorées, je fais ramer dans le même sens que les vagues et avec la même vitesse qu'elles, de manière à ce que l'image paraisse immobile sous le bateau. Le spectacle est alors d'un grand éclat ; c'est une brillante illumination du fond de l'eau.

(2) *Gazette de Lausanne*, 7 octobre 1887.

place qui coupera le pinceau lumineux : il y aura déplacement vertical des cônes de couleurs différentes, *R* rouge, *V* violet, ainsi que l'indique sommairement le croquis de la fig. 118. Mais si le soleil est oblique sur l'horizon, l'aberration de réfrangibilité déplacera latéralement ces mêmes cônes de couleurs différentes, ainsi que l'explique la fig. 119.



(Fig. 118.) Aberration de réfrangibilité des rayons verticaux.



(Fig. 119.) Aberration de réfrangibilité des rayons obliques.

De là, l'apparition du rouge sur le bord de l'image focale la plus rapprochée du spectateur, du violet ou du bleu sur le bord le plus éloigné. (1)

III. Illusion de grossissement des corps submergés dans l'eau. (2)

Tous les pêcheurs savent que les objets qu'ils voient dans l'eau leur apparaissent plus gros qu'ils ne sont en réalité. J'en ai fait cent fois l'expérience dans mes pêches d'antiquités lacustres et dans mes observations sur les rides de fond ; quelque habitué que je sois à être trompé, après quarante ans de pêches lacustres, je suis encore étonné chaque fois que je ramène à l'air et que je vois si petit un objet qui me paraissait énorme sous l'eau. Pour la mesure des rides de fond,

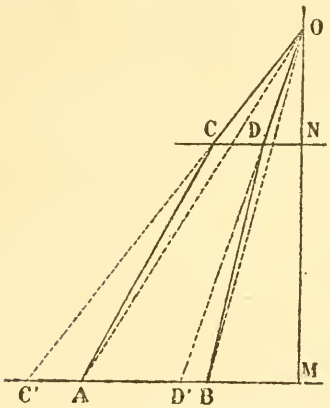
(1) Je dois une partie de cette interprétation à mon collègue et ami le professeur Ed. Hagenbach, à Bâle.

(2) V. Bull. S. V. S. N. XXII, 81. Lausanne, 1887.

je ne suis arrivé à un résultat certain qu'en plaçant au fond de l'eau une règle graduée sur les sillons dont je voulais connaître la largeur. Le grossissement varie avec la profondeur de l'eau ; il augmente quand la couche d'eau interposée s'accroît ; plus l'œil est rapproché de la nappe d'eau, plus l'illusion est forte. L'illusion varie aussi avec la limpidité de l'eau.

J'ai estimé ce grossissement illusoire, quand je suis dans une péniche, l'œil à 50 centimètres au-dessus de l'eau, et que je pêche par 4 ou 5 mètres de fond, au quart, au tiers et même plus, en sus de la grandeur réelle.

L'explication de ce phénomène d'illusion doit être cherchée, en partie dans un fait physique de réfraction, en partie dans un fait subjectif de fausse appréciation de la distance.



(Fig. 120.) Réfraction des rayons sortant de l'eau.

1° *Phénomène physique.* Les rayons lumineux qui apportent à notre œil l'image d'un objet submergé, sont réfractés en sortant de l'eau et entrent dans notre œil dans une direction plus inclinée que si l'objet était plongé dans l'air.

Soit un objet AB immergé sous une couche d'eau $p = MN$; soit notre œil O, élevé au-dessus de la nappe d'eau d'une hauteur $h = ON$. Les rayons lumineux partis de A et de B sont réfractés suivant les lignes ACO et BDO et entrent dans notre œil en formant l'angle $COD = a$. C'est l'angle de grandeur apparente de l'objet.

S'il n'y avait que de l'air entre l'objet et notre œil, les rayons partis de A et de B ne seraient pas réfractés et entreraient dans l'œil en formant l'angle $AOB = b$. Ce serait l'angle de grandeur réelle de l'objet.

L'objet AB vu à travers l'air et l'eau nous apparaît en $C'D'$, plus grand que AB. En effet, l'angle de réfraction augmentant avec l'obliquité des rayons incidents, $ACC' > BDD'$; d'où $AOC' > BOD'$, d'où $a > b$. [1]

La différence entre les angles a et b représente l'illusion de grossis-

[1] Voir : *A. Mousson,* Traité de physique. II, 379. Zurich, 1880.

sement due à la réfraction. Cette illusion peut s'exprimer de deux manières :

Fraction de grossissement soit aggrandissement apparent de l'objet

$$m = \frac{a - b}{b}$$

Fraction de réduction soit diminution de la grandeur apparente de l'objet pour arriver à la grandeur réelle

$$m' = \frac{a - b}{a}$$

Quelle est l'importance de cette illusion de grossissement ou de réduction ?

A la suite d'une discussion que j'avais soulevée sur cette question, dans la séance du 6 novembre 1872 de la Société vaudoise des sciences naturelles, feu le colonel Fritz Burnier m'avait communiqué une formule exprimant la fraction de réduction d'un objet situé dans la verticale. Cette fraction était représentée approximativement par

$$m' = \frac{p}{p + 44\,h}$$

c'est-à-dire que pour avoir la grandeur réelle d'un objet immergé sous l'eau, il faut en soustraire un peu moins du quart de sa grandeur apparente.

J'ai repris le problème d'une autre manière pour l'étendre aux cas où l'objet serait situé en dehors de la verticale et, en suivant le conseil de M. Ch. Dufour, je l'ai traité comme suit :

J'ai choisi pour l'angle de grandeur apparente a un angle constant, de 5^{m}. Puis j'ai cherché par le calcul, en me basant sur l'indice de réfraction de l'air à l'eau, $n = 1.336$, quel serait l'angle de grandeur réelle b d'un objet situé à différentes profondeurs d'eau, l'œil étant à différentes hauteurs au-dessus de l'eau. Ainsi, par exemple :

J'ai supposé mon œil à 1^{m} au-dessus de l'eau . . . . . $h = 1$
sur une eau de 4^{m} de profondeur . . . . . $p = 4$

Un objet AB, situé dans la verticale, dont les extrémités enverraient à mon œil des rayons entrant sous un angle de 5°, aurait dans ces conditions un angle de grandeur réelle b de 3° 59′.

L'illusion de grossissement serait dans ce cas.

$$m = \frac{a - b}{b} = \frac{1^\circ\, 1'}{3^\circ\, 59'} = 0.26.$$

J'ai choisi des hauteurs de l'œil au-dessus de l'eau de 0.5^m et de 1^m, soit la hauteur de mon œil quand je suis assis ou incliné dans une péniche, occupé à une pêche d'antiquités lacustres, et de 2^m, soit la hauteur de mon œil du pont d'un bateau à vapeur.

Voici pour différentes profondeurs d'eau, de 1 à 10^m, la fraction de grossissement m d'un objet situé dans la verticale :

p	$h = 0.5^m$	$h = 1^m$	$h = 2^m$
1^m	0.20	0.15	0.09
2	0.25	0.20	0.15
4	0.29	0.26	0.20
6	0.30	0.28	0.23
8	0.31	0.29	0.25
10	0.32	0.30	0.27

D'après ces chiffres l'illusion de grossissement est d'autant plus importante :

1° que l'œil est plus rapproché de la surface de l'eau.

2° que l'eau est plus profonde.

Dans le cas où l'illusion est la plus forte, dans les limites de mes données, l'œil étant à 50^{cm} au-dessus d'une eau de 10^m de profondeur, l'objet est grossi de 0.32 soit de près d'un tiers ; il nous apparaît de un tiers plus gros qu'il n'est en réalité.

Si nous cherchons à évaluer sa grosseur réelle d'après la grandeur apparente, nous devrons réduire celle-ci de 0.24, soit à peu près d'un quart.

J'ai ensuite cherché l'influence de l'obliquité plus ou moins grande d'un objet situé en dehors de la verticale. Pour cela j'ai calculé pour

une profondeur d'eau constante $p = 4^m$, et une hauteur de l'œil constante aussi, $h = 1^m$, la fraction de grossissement d'un objet situé à différentes distances du pied de la verticale. Je suis arrivé aux chiffres suivants pour différents angles d'inclinaison :

Angle d'inclinaison	Fraction de grossissement
2°.30′	0.26
22°.30′	0.28
27°.30′	0.30
32°.30′	0.31
37°.30′	0.32

Ainsi donc plus le rayon visuel est oblique, plus il se rapproche de la parallèle à la nappe d'eau, plus le grossissement illusoire est important.

Cela rend compte de l'illusion étrange qui soulève le sol autour du spectateur. Quand je navigue en bateau sur un fond horizontal, il me semble voir le sol se relever tout autour de mon bateau ; il me semble que je plane au-dessus d'un entonnoir.

Le fait physique de la réfraction explique donc bien une partie, la partie principale, de l'illusion de grossissement des objets submergés. (1)

2° *Illusion subjective.* — Il y a cependant, si je ne me trompe, à y ajouter un fait d'illusion subjective tenant à une fausse appréciation de la distance. Il me paraît que l'illusion de grossissement varie avec la transparence de l'eau, et cela de la manière suivante :

Quand l'eau est très limpide, comme dans les beaux jours d'hiver, alors que nous pratiquons nos pêches d'antiquités lacustres, nous ne voyons pas l'eau interposée entre l'objet immergé et notre œil : nous oublions l'existence d'un milieu différent de l'air. Et cependant cette eau est légèrement opaline, ou poussiéreuse ; les contours et les ombres des objets submergés sont moins nets que s'ils étaient dans l'air ; l'eau intercepte une partie de la lumière comme le fait la brume de notre

(1) L'eau de mer contenant près de 3 pour cent de chlorure de sodium, et ce sel possédant un indice de réfraction notablement supérieur à celui de l'eau distillée ($n = 1.575$), l'illusion de grossissement des objets immergés dans la mer doit être un peu plus forte que dans le cas d'immersion dans l'eau douce. La différence est peu importante.

atmosphère aérienne. De même que la brume semble éloigner les montagnes qui sont à l'horizon, l'objet immergé nous semble à une distance plus grande qu'il n'est en réalité.

Or la grandeur apparente d'un objet dépendant du rapport entre la grandeur de l'angle visuel et la distance à laquelle nous paraît l'objet, il résulte d'une erreur en plus dans l'appréciation de la distance une illusion de grossissement. Celle-ci s'ajoute à l'illusion que nous avons vue provenir de la réfraction. Quand l'eau est limpide, l'illusion de grossissement est énorme.

Au contraire, quand l'eau est peu limpide, quand un trouble apparent nous masque presque entièrement le sol, ou bien quand l'eau est assez profonde pour donner une teinte bleu-verdâtre aux objets reposant sur le fond, nous voyons l'eau, nous avons conscience nette de l'existence d'un milieu interposé, nous faisons moins erreur sur la distance qui nous sépare de l'objet que nous regardons. Il n'y a pas ou il n'y a que peu d'illusion subjective ; il n'y a dans ce cas que peu d'aggravation de l'illusion physique de grossissement due à la réfraction.

Les différences dans l'intensité de l'illusion de grossissement que je constate d'un jour à l'autre suivant la limpidité plus ou moins grande de l'eau, doivent donc être attribuées à un fait subjectif de fausse appréciation des distances.

Je conclus

L'illusion de grossissement d'un objet submergé varie. Elle est d'autant plus grande :

1° Que l'eau est plus profonde ;

2° Que l'œil est moins élevé au-dessus de la nappe de l'eau ;

3° Que l'objet regardé est plus éloigné de la verticale.

Ces trois faits sont dus au phénomène physique de la réfraction.

4° Que l'eau est plus opaline tout en restant cependant assez limpide pour n'être pas perçue comme un milieu interposé.

Ce dernier fait cause une illusion subjective par fausse appréciation de la distance.

L'illusion de grossissement d'un objet immergé peut s'élever à un tiers et plus de la grandeur réelle de l'objet.

II. COULEUR DE L'EAU.

L'eau claire, qui paraît incolore dans un verre ou dans un bassin peu profond, prend une teinte très prononcée quand on la regarde par transparence, sous une épaisseur suffisante. C'est la couleur propre de l'eau.

On l'étudie en remplissant d'eau un tube [1] opaque, de 4 mètres et plus de longueur, fermé aux extrémités par des lames de verre transparent et en regardant au travers de l'eau une surface blanche bien éclairée. La méthode a été inaugurée par Bunsen en 1847; pour abréger, j'appellerai cet appareil tube de Bunsen. On voit alors, si l'eau est suffisamment limpide, le blanc de l'écran teinté de nuances [2] bleuâtres, verdâtres, jaunâtres ou orangées, suivant la nature de l'eau Le ton est d'autant plus foncé que la longueur du tube est plus grande

Dans un lac suffisamment profond, on peut étudier la couleur de l'eau directement sans aucun appareil ou instrument; mais il faut certaines précautions pour se garer de diverses causes disturbantes, des actions colorantes accessoires qui troubleraient l'observation; l'on doit éliminer entr'autres la lumière réfléchie sur la surface miroitante de l'eau et la lumière réfléchie sur le sol coloré du lac. Cette dernière est facilement écartée si l'on ne fait la recherche qu'en plein lac, en un point où l'eau ayant plus de 20^{m} d'épaisseur, le fond du lac n'apparaît plus à l'œil, semble noir, et ne renvoie plus de lumière: c'est la région que nous apppelons sur le Léman l'eau bleue. [3]

Quant à la lumière réfléchie par la surface de l'eau, lumière colorée par l'image des montagnes riveraines et du ciel avec ou sans nuages, on la supprime en regardant l'eau suivant un rayon vertical, perpendiculaire à la surface. Quand le rayon visuel est normal à la nappe d'eau, la lumière réfléchie est réduite à son maximum et la couleur de l'eau

[1] Le tube que j'emploie mesure 6^{m} de longueur, 3^{m} de diamètre, en feuilles de zinc, fermé aux deux extrémités par des glaces transparentes; à chaque extrémité, un petit ajutage vertical ascendant permet d'y verser l'eau au moyen d'un entonnoir et de laisser sortir l'air pendant le remplissage et le vidage du tube.

[2] En suivant la nomenclature de Chevreuil, j'appelle tons de la couleur les diverses teintes que présente la même nuance suivant qu'elle est plus ou moins mélangée de bleu ou de noir, nuances de la couleur, les diverses teintes que présente le même ton suivant qu'il contient des proportions différentes des couleurs fondamentales de la lumière.

[3] On l'appelle ailleurs *le noir*.

est dominante. Pour éteindre encore mieux la lumière externe réfléchie à la surface de l'eau, l'observateur qui se penche en dehors du bateau n'a qu'à regarder au milieu de l'image obscure formée par sa propre figure : il peut élargir ce champ obscur en étendant au-dessus de sa tête un écran noir (un parapluie, par ex.). — Je trouve encore facilement la couleur propre de l'eau en cherchant, sur le pont du bateau en marche, le point où la vague de refoulement s'incline contre le corps du navire ; la surface de réflexion renvoie alors l'image du corps noir [1] du bâtiment qui n'émet que très peu de lumière, et la couleur propre de l'eau apparaît presque sans mélange. On peut obtenir fort bien la couleur propre de l'eau d'un lac en regardant obliquement par-dessous le corps d'une barque peinte en noir qui navigue en plein lac, ou par-dessous le bateau radeleur qui vient assez loin des côtes accoster le bateau à vapeur ; la condition dans laquelle le ton est le plus brillant, c'est lorsque le bateau qui fait écran est entre nous et le soleil.

Enfin l'on trouve sur quelques navires certain trou ou canal permettant au rayon visuel de plonger verticalement dans l'eau. La couleur est dans ce cas étonnamment brillante, mais la comparaison avec une gamme de teintes n'est souvent pas facile, vu le mauvais éclairage du cabinet.

La couleur de l'eau profonde d'un lac étudiée dans la verticale est d'un ton relativement foncé ; en effet, au lieu d'apparaître sur une surface blanche, éclairée, comme dans le tube de Bunsen, elle se montre sur le fond obscur, noir du lac ; elle est mélangée de noir. Suivant la nomenclature de Chevreuil, tandis que le ton était abaissé sur un fond blanc, il est élevé sur un fond noir ; dans la langue des peintres, le ton de l'eau profonde est abattu.

Il est un moyen très élégant d'étudier la couleur propre de l'eau en plein lac, sans être troublé en rien par la lumière réfléchie à la surface de l'eau. Prenez un miroir, une glace argentée, par exemple, et plongez-la dans l'eau en l'inclinant sous un angle de 45° [2] ; le rayon

[1] Si le bâtiment est peint de couleurs claires, celles-ci se réfléchissent sur l'eau et altèrent la couleur propre du lac.

[2] Le procédé du miroir que nous devons à Wittstein (Pogg. Ann. XLV, 474) peut être employé à étudier la couleur de l'eau dans un étang, dans un ruisseau sans profondeur, où l'eau est assez limpide pour ne montrer directement aucune trace de coloration. Sur le miroir de Wittstein on voit la couleur de l'eau, parfois de teintes admirables, et la méthode semble excellente. Toutefois, comme nous le dirons plus loin, la lumière réfléchie dans une eau peu profonde par le sol coloré lui-même influe sur la couleur de l'eau vue suivant le rayon horizontal et la modifie souvent gravement.

visuel est réfléchi horizontalement et l'œil traverse une étendue indéfinie d'eau brillamment illuminée qui lui montre sa couleur propre; l'éclat de l'image colorée réfléchie sur le miroir est tel qu'il éteint complètement toute réflexion du ciel, des nuages ou des côtes sur la surface de l'eau. Mais dans ces expériences le ton de l'eau est considérablement modifié, il est abaissé, il est mélangé de lumière blanche; toute la masse d'eau qui envoie sa couleur à l'œil est fortement éclairée, et il n'y a rien d'analogue à l'écran sombre du fond noir du lac qui élève le ton lorsque l'on étudie la couleur de l'eau suivant le rayon vertical.

Cette couleur propre de l'eau varie d'un lac à l'autre, la nuance en est différente; elle est dans les uns d'un bleu presque pur, ailleurs verte, ailleurs vert-brun, ailleurs brun-noir. Parmi les lacs bleus on cite : le Léman, le lac d'Annecy, le Benaco ou lac de Garde, les lacs bleus d'Arolla et de Kandersteg, le Lünersée (Scesaplana), le lac d'Achen (près Innsbruck), le lac Tahoë, en Californie, etc. La grande généralité des lacs, ceux de la Suisse et de la Bavière en particulier, sont verts; les eaux des marais tourbeux sont brun-noir.

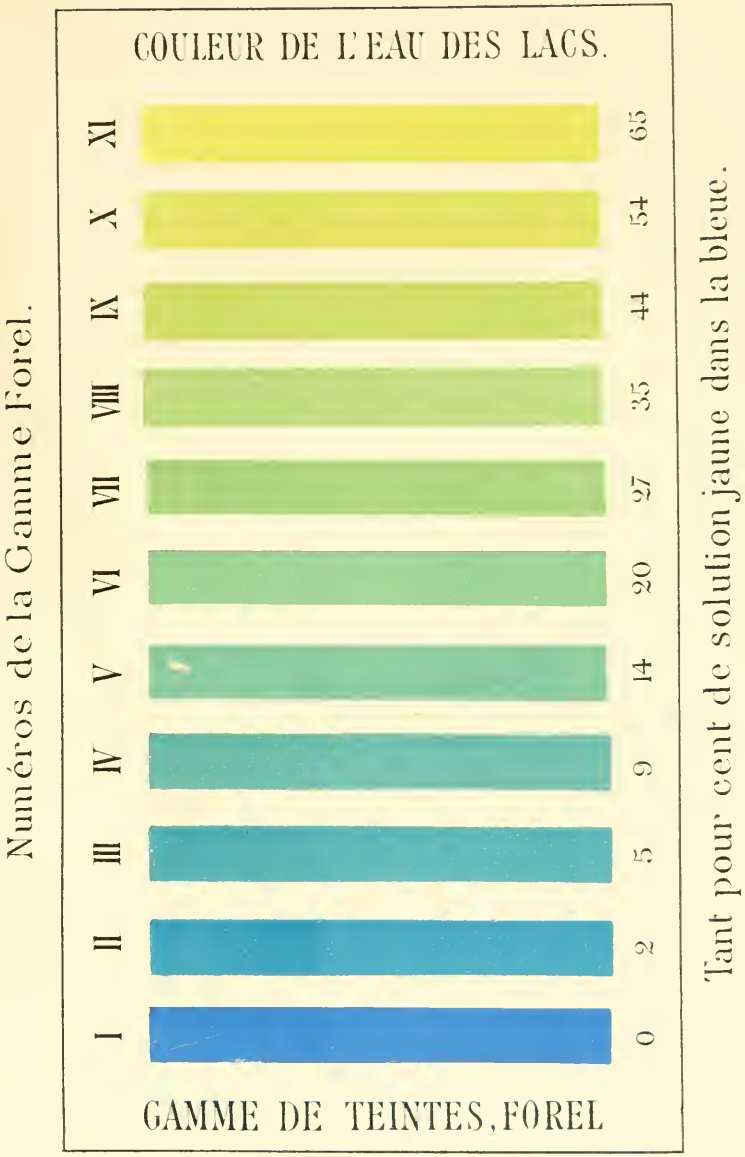
La question est depuis longtemps posée : à quoi tiennent ces différences de couleur?

Pour étudier systématiquement la couleur des lacs, j'ai employé deux méthodes d'observation :

La première consiste à prendre la note de la nuance ou du ton avec des craies de pastel frottées sur un carton grisâtre; avec un peu d'exercice, on arrive assez vite à obtenir la couleur de l'eau et à la fixer par une note définitive. La preuve que j'arrive assez exactement à la justesse de la teinte, c'est que si, le même jour et dans les mêmes conditions, je prends successivement deux ou trois notes de la couleur de l'eau, et que je les compare après le travail terminé, je les trouve très suffisamment semblables entr'elles.

Il y a cependant une assez grande difficulté à rendre avec les couleurs opaques du pastel la couleur transparente de l'eau; puis le matériel d'observation finit par devenir assez encombrant. Aussi ai-je cherché une autre méthode. Je me suis fait une gamme de couleurs transparentes en adoptant la disposition suivante :

Je fais deux solutions aqueuses, l'une bleue, de sulfate de cuivre



Lithogr. Muller, Lausanne

ammoniacal, l'autre de chromate neutre de potassium, l'une et l'autre au 1 : 200e. En voici la formule :

Solution bleue	Sulfate de cuivre	1
	Ammoniaque	5
	Eau distillée	194
		200
Solution jaune	Chromate neutre de potassium	1
	Eau distillée	199
		200

Je mélange ces solutions en proportions convenables et j'obtiens les numéros suivants pour une gamme de teintes régulièrement décroissantes :

	Solution jaune.	*Solution bleue.*
I	0	100
II	2	98
III	5	95
IV	9	91
V	14	86
VI	20	80
VII	27	73
VIII	35	65
IX	44	56
X	54 (1)	46
XI	65	35

Dans mes premières études sur ce sujet, 1888-1889, j'ai caractérisé les teintes des eaux en indiquant le tant pour cent de solution jaune dans la bleue. Mais j'ai reconnu que l'intensité de coloration de la solution de jaune de chrome est plus forte que celle du bleu de cuivre, et que par conséquent les valeurs centésimales de solutions égales ne sont pas proportionnelles au point de vue optique. Je préfère par conséquent donner simplement pour la caractéristique des nuances

(1) Pour les mélanges qui contiennent plus de 50 % de solution jaune, ajoutez au besoin quelques gouttes d'ammoniaque jusqu'à ce que le liquide soit parfaitement limpide.

des lacs, les numéros de ma gamme à laquelle je me suis efforcé de trouver une progression régulière.

Des deux solutions que je mélange, la jaune est de beaucoup la plus puissamment colorée [1]; par conséquent, dans la série régulière des proportions centésimales, les tons jaunes prédominent de beaucoup sur les bleus. Pour rendre l'échelle de ma gamme à peu près régulière, j'ai adopté les proportions que je viens de donner; les numéros sont suffisamment équidistants.

D'après les appréciations de M. O. Krümmel, les numéros de ma gamme correspondraient approximativement aux longueurs d'onde suivantes :

N° I	de la gamme	λ 479 $\mu\mu$ [2]
II		486
III		495
IV		504
V		514
VI		527

La chimie nous apprend que dans ces solutions le mélange se transforme en partie par recomposition chimique en un corps nouveau, le chromate de cuivre ammoniacal. Mais l'expérience m'a montré que l'intervention de ce composé n'altère en rien la progression régulière de la gamme des couleurs.

L'on sait qu'une solution change de nuance si elle est plus ou moins saturée ou si elle est en couches plus ou moins épaisses. J'ai indiqué le degré du mélange que j'ai trouvé le plus pratique : solution au $\frac{1}{200^e}$ [3]. Quant à l'épaisseur du liquide, j'ai choisi des tubes de verre blanc de 8^{mm} de diamètre interne. Si l'on veut conserver sans altéra-

[1] Des expériences comparatives m'ont montrés que le pouvoir colorant est dans les relations suivantes :

Solution de bleu de cuivre.		Solution de jaune de chrome.
1 : 1000	plus fort que	1 : 1000
1 : 5000	égal	1 : 10000
1 : 10000	égal	1 : 40000
1 : 10000	plus faible que	1 : 50000

[2] λ = longueur d'onde.
$\mu\mu$ = millionnièmes de millimètres.

[3] Les solutions au 1 : 100e que j'avais d'abord employées sont d'un ton trop brillant qui éteint trop par comparaison la teinte peu éclairée de la lumière venant du lac, et fait paraître celle-ci grise. Les solutions au 1 : 200e sont en revanche trop colorées pour l'étude de l'eau dans un tube de Bunsen de 6^m de long; dans ce cas, j'emploie des solutions au 1 : 300e. Suivant les nécessités, on peut changer le titre de la solution.

tion les liquides colorés, on fera bien de sceller à la lampe les tubes de verre. (1)

Pour autant que les couleurs opaques de la chromolithographie sur papier peuvent représenter les couleurs transparentes d'une solution liquide, la planche IX, p. 464, donnera une idée des tons et des nuances de la gamme que j'emploie. (2) J'y renvoie pour toutes les caractéristiques de couleur que j'aurai à citer.

Cette gamme de couleurs est d'un usage commode; en la rapprochant de l'œil ou en l'éloignant, en l'éclairant plus ou moins, on arrive bientôt à éliminer deux séries de tubes qui sont certainement les uns plus bleus, les autres plus jaunes que l'eau que l'on étudie: on resserre de plus en plus les termes de comparaison, et on atteint enfin une détermination très sûre. Il y a toutefois certaines difficultés qui résultent en particulier de deux causes :

a. Le contraste simultané des couleurs environnantes, ciel, rive opposée, bord du bateau, etc., qui altèrent l'impression donnée à notre œil par la masse d'eau considérée.

b. La différence des tons; suivant l'état de la surface du lac, suivant l'éclairage ou suivant la limpidité des eaux, la couleur propre de l'eau étudiée dans le rayon vertical est d'un ton plus clair ou d'un ton plus foncé que celui des tubes de ma gamme avec leur solution au 1 : 200e. Parfois il faudrait une solution plus concentrée, parfois une solution plus étendue, et je dois avouer que cette différence de tons rend souvent la détermination de la couleur peu aisée.

Cependant, je puis dire avoir fréquemment essayé l'observation avec des amis et des camarades d'excursion, plus ou moins bien préparés à cette expérience; nous arrivons généralement aux mêmes appréciations et nous indiquons tous comme nuance de l'eau les mêmes numéros de ma gamme. L'incertitude n'est jamais bien forte et reste toujours entre deux numéros de la gamme. C'est tout ce qu'on peut demander à une méthode dans des conditions aussi peu précises d'expérimentation. (3)

(1) Il faut même apporter une grande attention à cette fermeture absolument hermétique; sinon l'ammoniaque s'évapore et le liquide s'altère très vite.

(2) Les naturalistes qui voudraient essayer ma gamme la trouveront chez M. C.-S. Penfold, fabrique d'instruments de physique, 10, Grand'Rue, Genève.

(3) Ma gamme de couleurs a été composée pour l'étude des eaux du Léman et des lacs subalpins. Elle a cependant pu être utilisée ailleurs et plusieurs de mes amis ont pu préciser, grâce à elle, les nuances d'eaux très diverses. M. le prof.

En possession de ces deux méthodes, j'ai étudié la couleur des lacs, et j'ai commencé par une première constatation très importante. J'ai reconnu que la couleur d'un lac est constante et ne varie que dans des limites assez restreintes. Certains lacs sont bleus, et toujours bleus, d'autres lacs sont glauques, d'autres lacs sont verts.

C'est par une étude prolongée des eaux du Léman que j'ai établi cette loi. Pendant deux années, 1886-1887, j'ai noté dans toutes les circonstances possibles la couleur de l'eau avec mes crayons de pastel; en 1887 et 1888, j'ai utilisé pour ces études un colorimètre fort ingénieux, que m'avait confié un ami, M. F. Cornu, chimiste à Bâle: pendant cinq années, à partir de 1887, j'ai comparé à ma gamme de couleurs les nuances de l'eau chaque fois que je naviguais sur le lac. J'ai reconnu que j'avais toujours devant moi de l'eau bleue, légèrement teintée de vert; j'ai reconnu en même temps que je rencontrais deux éléments de variations, à savoir :

1° Lorsque l'eau trouble d'affluents débordés s'est déversée à la surface du lac, l'eau de celui-ci est salie et sa couleur est altérée localement. Ces eaux sales, qui jaunissent ou verdissent le bleu du lac, sont en général étalées en taches plus ou moins étendues, occupant parfois quelques kilomètres carrés; elles sont bien délimitées et doivent être évitées pour une bonne définition de la couleur de l'eau du lac.

2° Il y a une variation notable résultant de la limpidité des eaux du lac. Quand les eaux du Léman sont limpides, elles sont plus bleues, quand elles sont opalines, elles sont plus vertes. C'est ainsi que les eaux d'hiver plus transparentes sont exprimées par les numéros III-IV de ma gamme de couleurs, plus exactement 6 à 8 % de jaune, les eaux d'été par les numéros IV-V, plus exactement 10 à 12 %. Telles sont les limites extrêmes de la variation de couleur de la masse générale du lac, et je puis définir la couleur moyenne du Léman par le n° IV de ma gamme, soit un mélange de 91 de solution bleue et de 9 de solution jaune.

Pour les autres lacs, mes études sont moins serrées. Depuis 1874,

O. Krümmel, de Kiel, pendant l'expédition du *National*, s'en est servi avec succès pour caractériser les teintes des diverses régions de l'Atlantique. Il l'a appelée du nom de Xanthomètre. (Ergebn. der Plankton-Expedition I. C. 89. Kiel, 1893). M. le Dr J. Montfort, de Morges, l'a de même facilement utilisée dans une traversée de l'Atlantique de Bordeaux à Buenos-Ayres, en novembre 1888. (Archives de Genève XXI, 271, 1889.) M. Elisée Reclus et M. H. Golliez s'en sont aussi servis avec fruit pour l'étude des eaux de l'Amérique du Nord.

j'ai toujours noté la couleur du lac sur lequel je naviguais, en l'exprimant par les qualificatifs bleu, bleu-vert, vert-bleu, vert; depuis que j'ai des méthodes plus précises, 1886, je n'ai pas manqué de profiter de chaque occasion pour les appliquer sur diverses eaux. Le résultat de cette étude, intermittente mais prolongée, est que chaque lac a sa teinte normale, à lui spéciale; qu'elle varie dans des limites peu étendues; que sauf les accidents locaux dus en particulier au trouble des eaux torrentielles, les lacs verts sont toujours verts, les lacs bleus sont toujours bleus.

Voici, toutes réserves faites sur le petit nombre d'observations que j'ai pu faire dans chaque lac, la teinte que j'attribue à quelques-uns de nos lacs subalpins :

Léman	N° IV	de la gamme (p. 464).
Neuchâtel	VI-VII	
Morat	X-XI (?)	
Zurich	VI-VII	
Zoug	VI-VII	
IV Cantons	VII	
Bodan	VI-VII	
Annecy	IV-V	
Ceresio	VII	
Verbano	VII	
Lario	VII	
Joux	IX-X	
Lac bleu de Lucel, Arolla	IV	

Outre ces nuances de bleu et de vert qui sont appréciées par les numéros de ma gamme, les eaux de certains lacs ont des mélanges de teintes grises, brunes ou rougeâtres que je suis obligé de désigner par des qualificatifs. Ainsi le lac de Morat par exemple est très fortement brunâtre, le lac de Bret rougeâtre. Le mélange de couleur est dans ces cas plus compliqué que celui qu'on peut obtenir par la simple combinaison du bleu et du jaune, et pour une étude complète des lacs, il serait nécessaire de perfectionner ma gamme de couleurs. [1]

[1] Pour l'étude des lacs à eaux brunâtres, fortement tourbeuses, de l'Allemagne du Nord, M. le Dr W. Ule, de Halle, a modifié heureusement ma gamme en y ajoutant une solution brune de sulfate de cobalt au 1 : 200e dans une eau fortement

Il y a donc des lacs à eaux bleues, il y a des lacs à eaux vertes. Quelle est la cause de ces différences ?

Avant tout il y a une question préjudicielle à résoudre : Comment l'eau d'un lac peut-elle paraître bleue ou verte, quand le fond du lac est noir ? Nous avons vu dans un paragraphe précédent que dans les grands fonds du lac la lumière ne pénètre plus et que les couches profondes doivent être sans lumière, par conséquent noires. Un corps transparent vu sur fond noir doit paraître noir. Si dans le tube de Bunsen nous regardons à travers l'eau une surface noire, nous ne voyons que du noir.

Si l'eau était physiquement pure, il en serait de même dans les lacs (à supposer que le fond restât noir, et ne reçût pas la lumière qu'aucun obstacle n'arrêterait sur son passage) ; l'eau nous paraîtrait noire et incolore. Mais l'eau n'est pas pure ; elle contient les myriades de poussières que nous avons étudiées à propos de la transparence. Ces poussières arrêtent la lumière et la renvoient sous forme de lumière diffuse qui revient à l'œil de bas en haut ; chacune de ces poussières représente un petit écran blanc ou blanchâtre qui réfléchit la lumière. Elles se superposent optiquement et nous empêchent de voir le noir du fond de l'eau.

Mais chacune d'elles, en nous renvoyant de la lumière, fait l'effet de la plaque blanche de l'expérience du tube de Bunsen ; la lumière blanche, en traversant l'eau de retour, se change en lumière colorée, et si l'épaisseur d'eau est suffisante, si la moyenne de ces trajets de retour est supérieure à 6^{m}, la couleur doit être la couleur de l'eau.

D'une autre part la lumière qui est renvoyée par les poussières n'est pas de la lumière blanche ; elle a déjà été altérée par le passage à travers l'eau qui a absorbé tout ou partie des rayons rouges et jaunes ; c'est de la lumière bleuâtre qui éclaire les poussières entre deux eaux. De là encore une cause de renforcement des nuances bleues de la lumière diffusée dans l'eau du lac.

ammoniacale. Comme base, il prend la solution verdâtre du n° XI de ma gamme et obtient les numéros XI à XXI par les mélanges suivants.

	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI
Solution verte . . .	100	98	95	91	86	80	73	65	56	46	35
Solution brune . .	0	2	5	9	14	20	27	35	44	54	65

Cette gamme du Dr Ule est d'un excellent usage pour les eaux tourbeuses des petits lacs alpins. (*W. Ule.* Die Bestimmung der Wasserfarbe in den Seen. Petermann's Mitth. 1892. 70.) Voyez encore Petermann's Mitth. 1894. 213.

Le ton sera du reste d'autant plus abaissé, ou lavé de blanc, que le nombre de ces poussières sera plus considérable ; si elles sont nombreuses, elles arriveront à faire un écran complet avant que l'épaisseur du trajet soit tel que la couleur très faible de l'eau n'apparaisse. Si elles sont rares, il reviendra assez de lumière diffuse des profondeurs suffisantes pour que la couleur de l'eau devienne évidente. Dans les eaux très limpides, l'écran n'arrive même pas à se former entièrement, et le noir des grands fonds vient élever le ton (ou le rabattre dans la langue des peintres).

C'est donc à la diffusion de la lumière sur les poussières en suspension dans l'eau qu'est due l'apparition de la couleur propre de l'eau pour l'observateur qui navigue en bateau sur un lac, ou dont le regard plonge d'un point élevé, de Glion ou de Naye sur le Léman, du Burgenstock sur le lac de Lucerne. (1)

Dans l'étude de ce problème : Pourquoi certains lacs sont-ils verts, d'autres bleus ? je crois bien faire de scinder la question en deux parties : l'une la détermination de la couleur normale fondamentale de l'eau ; l'autre la détermination des causes qui font dévier cette couleur dans les nuances caractérisant les diverses eaux.

Quelle est la couleur propre de l'eau, de l'eau pure, de l'eau distillée ? La réponse en a déjà été donnée en 1847 par R. Bunsen (2) qui, à l'aide de son tube, a reconnu que c'est le bleu, le bleu azur, le bleu du ciel. Cette constatation a été confirmée par toutes les recherches entreprises depuis lors ; Soret (3) et W. Spring (4) en particulier en distillant l'eau avec toutes les précautions possibles, en la laissant reposer indéfiniment longtemps, ont obtenu du bleu d'autant plus azuré que l'eau était plus pure.

D'après cela, se serait l'eau des lacs bleus qui se rapprocherait le plus de la couleur de l'eau pure. Le Léman, le Benaco, l'Achensée, les lacs bleus de Lucel et de Kandersteg auraient presque la couleur de l'eau distillée. Les lacs verts s'en écarteraient le plus.

(1) V. *E. Rambert*. Le rayon bleu, Bibliothèque universelle II 385, Lausanne 1879.

(2) *R. Bunsen*. Pseudo-vulkanische Ercheinungen Island's. Annal. d. Chemie u. Pharm. LXII, 44, 1847.

(3) *J.-L. Soret*. Sur la couleur de l'eau. Arch. Genève, XI, 276, 1884.

(4) *W. Spring*. La couleur de l'eau. Bull. acad. r. de Belgique, V, 55, 1883.

Ce n'est cependant pas à la pureté chimique de l'eau qu'est liée cette couleur bleue. En effet, celle-ci n'est nulle part aussi brillante que dans l'eau de mer, qui est très chargée de sels minéraux ; elle en contient en moyenne 3.4 %. La couleur de la mer, quand elle n'est pas salie par des causes externes, est d'un bleu splendide ; le bleu y est plus pur encore que dans le lac Léman ou le lac bleu de Lucel. Tandis que ces derniers sont caractérisés par le n° IV de ma gamme, j'ai pu constater dans une double traversée de la Méditerranée, de Marseille en Algérie et Tunisie, mars et avril 1888, et vers l'île de Capri du golfe de Naples, avril 1890, que la couleur de cette mer s'exprime par les n°s II et III de la même gamme. C'est le même bleu que celui de nos beaux lac bleus, mais encore plus intense, plus saturé, plus pur. Dans l'Atlantique, au sud du 40° de latitude boréale, Krümmel a trouvé ordinairement la teinte correspondant au n° II de ma gamme ; dans la mer des Sargasses et sur la côte du Brésil, il a même rencontré le n° I, le bleu du sulfate de cuivre ammoniacal pur. (1) La dissolution dans l'eau de matières minérales incolores n'altère donc pas la couleur propre du liquide.

D'où provient cette couleur bleue ? Ne serait-ce pas un renvoi de la couleur bleue du firmament ? La lumière incidente étant bleue, la lumière réfléchie ne peut avoir une autre couleur. Mais la plus simple observation nous montre que le Léman est aussi bleu sous un ciel blanc, sous un brouillard gris, sous le nuage noir d'une giboulée de neige que sous l'azur d'un beau jour d'été. L'éclat, l'intensité, le ton de la couleur, ses qualités accessoires varient seuls suivant ces conditions. La nuance n'est aucunement modifiée. Donc ce n'est pas la couleur de la lumière incidente qui est la cause de la couleur bleue de l'eau.

Quelle est la nature de cette couleur bleue ? La lumière qui arrive du soleil et qui éclaire la plaque blanche du tube de Bunsen ou la masse de l'eau du lac est blanche ; les divers rayons différemment colorés y sont mélangés dans les proportions normales de la lumière blanche. Puisque l'eau est bleue par transparence, il faut qu'il y ait absorption de tous ou de la majorité des rayons peu réfrangibles qui forment la partie rouge, jaune du spectre. Tel est bien le fait ; c'est ce que prouve l'étude spectroscopique de la couleur de l'eau, qu'elle soit

(1) Loc. cit. p. 468.

faite dans la grotte bleue de Capri, comme l'a vu Vogel [1], qu'elle soit faite dans le tube de Bunsen comme l'ont observé Soret et Sarasin [2], qu'elle soit faite dans les eaux d'un lac bleu, comme nous l'avons vu, Ed. Hagenbach et moi, dans le lac bleu de Lucel en 1887 [3]. Le spectre de l'eau ne montre plus trace de rouge, le jaune est très pâle, la ligne *D* est à peine visible, le vert, le bleu, l'indigo sont très brillants. Il y a une grande analogie entre ce spectre d'absorption de l'eau et celui du sulfate de cuivre.

L'étude la plus complète sur ce sujet a été faite en 1891 par MM. G. Hüfner et E. Albrecht à Tubingen [4] qui ont entre autres montré qu'une colonne d'eau pure de 1.8^{m} de longueur ne laisse passer que 0.49 du rouge, 0.62 de l'orange, 0.81 du jaune, 0.92 du vert, 0.95 du bleu. Il en résulte qu'il y a absorption très rapide de toute la partie rouge et jaune de la lumière, et que, pour les grandes épaisseurs d'eau, le bleu seul arrive à les traverser.

Quant à la nature essentielle de la modification intime qui transforme la lumière blanche du soleil en lumière bleue de l'eau, j'en laisse l'étude aux maitres de la science qui ont seuls le droit de parler dans des problèmes de cette difficulté ; les Tyndall, Soret, Hagenbach, Le Conte ont montré qu'il y a dans ce phénomène concurrence d'absorption sélective et de diffusion également sélective, tellement, que les grandes ondes lumineuses du rouge et du jaune étant éteintes, et les ondes de l'extrémité bleue du spectre étant seules réfléchies, il ne nous arrive à l'œil que les ondes les plus réfrangibles, les plus petites, celles du bleu et du violet.

Le bleu presque pur, très légèrement nuancé de vert, étant la couleur de l'eau pure, eau distillée, eau des lacs bleus, ou de l'eau tenant en solution des matières minérales incolores, quelle est la cause des nuances divergentes qui font certaines eaux vertes, les autres brunes, les autres noires ?

(1) *H.-W. Vogel.* Spektroscop. Unters. des Lichts der blauen Grotte von Capri. Pozzend. Ann. CLVI, 2. 325 Leipzig, 1875.

(2) Soc. phys. Genève, 21 février 1884. Arch. XI, 327, Genève, 1884.

(3) [Loc. cit. p. 455.]

(4) Ann. der Physik u. Chimie, XLII, 1. Leipzig, 1891.

Voici les diverses explications qui ont été données par les auteurs modernes :

En 1847, R. Bunsen [1], après avoir constaté que l'eau pure est bleue, attribue la couleur verte de la plupart des eaux lacustres à des particules jaunâtres en suspension dans le liquide, la couleur brunâtre à des sels humiques de la tourbe.

En 1848, Ste Claire Deville [2] expliquait la couleur verte des eaux par une substance colorée qui donnerait au résidu d'évaporation une couleur jaune ou brunâtre ; les eaux bleues donneraient un résidu blanchâtre. (Cette observation n'a pas été confirmée.)

En 1860, Wittstein [3] estime que la couleur verte est due au mélange de matières organiques en solution, tandis que les matières minérales ne modifient pas le bleu. Les matières organiques seraient dissoutes par les alcalis.

En 1870, John Tyndall [4] attribue la couleur bleue du lac Léman aux fines particules en suspension dans l'eau glaciaire. La cause de la couleur bleue serait donc, d'après lui, une sélection dans la lumière réfléchie.

De 1869 à 1874, MM. J.-L. Soret, Lallemand et Ed. Hagenbach étudient la polarisation de la lumière renvoyée par l'eau d'un lac. Ils constatent qu'elle est polarisée dans la direction perpendiculaire aux rayons solaires réfractés. Par un temps couvert, il n'y a pas trace de polarisation. [5]

En 1883, W. Spring, de Liège, cherche la cause de la couleur verte des lacs dans la présence d'un précipité très menu de carbonate de calcium, précipité qui n'aurait pas lieu dans les eaux bleues par le fait d'un excès d'acide carbonique. [6]

En 1886, le même auteur croit confirmer son hypothèse en montrant que les eaux des lacs bleus sont moins lumineuses que celles des lacs

(1) [Loc. cit. p. 471.]

(2) Ann. Chimie et physique XXIII, 40. Paris, 1848

(3) [Loc. cit. p. 463.]

(4) Couleur du lac de Genève. Analysée par J.-L. Soret. Arch. Genève, XXXIX, 343, 1870.

(5) Arch. Genève XXXIV, 156 ; XXXV, 54 ; XXXVII, 129, 176 ; XXXIX, 341, 352 ; XLVIII, 231 ; L, 243. 1869-1874.

(6) [Loc. cit. p. 471.]

verts, qu'il y a chez les premiers moins de lumière réfléchie que chez les seconds. [1]

En 1883, le professeur John Le Conte, de l'Université de Californie, à Berkeley, dans une étude sur la couleur de l'eau du lac Tahoë, attribue la couleur des eaux vertes à deux causes différentes [2] : à des matières colorantes en solution; à des matières colorées en suspension.

En 1884, J.-L. Soret, de Genève [3], dans l'étude magistrale qu'il a consacrée à la couleur de l'eau, donne, pour la couleur des eaux vertes, quatre causes possibles :

a. Des matières minérales ou organiques en dissolution dans l'eau.

b. Des particules très ténues qui interceptent les rayons les plus réfrangibles et font virer la couleur de l'eau vers le vert (absorption sélective).

c. La diffusion de la lumière sur des particules nombreuses et grossières les fait réfléchir des rayons rouges et non pas seulement des rayons bleus, comme le feraient des particules très fines. En même temps, dans une eau fortement chargée de poussières, la diffusion vient surtout des couches superficielles dans lesquelles les rayons peu réfrangibles sont peu absorbés (diffusion sélective).

d. Des corpuscules colorés, algues ou autres, en suspension dans l'eau, doivent aider à la coloration des eaux.

Voilà donc où en est la question. L'eau est bleue ; elle est colorée en vert ou brun dans certaines eaux. Plusieurs causes de ces colorations divergentes sont possibles. Toutes interviennent-elles, ou bien y a-t-il une seule et même cause générale différemment agissante ? Tel est le problème qui se pose à moi.

Tout d'abord j'avais à apprécier l'hypothèse intéressante et en apparence fort plausible de M. Spring, qui attribue la couleur verdâtre de certaines eaux à la présence d'un précipité très ténu, pseudo-colloïdal comme il l'appelle, de matières en suspension, d'argile ou de calcaire. Ses expériences de laboratoire lui ont montré que, dans un tube de Bunsen, il pouvait transformer l'eau physiquement pure, d'un bleu d'azur, en une eau verte ou jaune, en développant dans cette eau des nuages très délicats de poussières impalpables, transparentes. Un tel

(1) Bull. Acad. royale de Belgique, XII, 814. 1886.

(2) Physic. studies on lake Tahoë. Overland Monthy. Dec. 1883. p. 595.

(3) [Loc. cit. p. 471.]

précipité rend verdâtre ou jaunâtre à la lumière transmise l'eau qui, par elle-même, serait bleue. Cette expérience fondamentale faite, M. Spring a cherché à en démontrer l'application à la théorie de la couleur des lacs, et il s'est attaché à reconnaître la différence de luminosité, d'éclairage des eaux différemment colorées de divers lacs. Il a reconnu par des observations sur les lacs de Kandersteg (bleu pur), de Lucerne (vert), de Brienz (jaunâtre), que la quantité de lumière renvoyée par l'eau est d'autant plus grande que la teinte du lac s'éloigne plus du bleu.

Elle est de	1.00	pour le lac	bleu de Kandersteg.
—	1.09	—	vert de Lucerne.
—	1.27	—	jaune de Brienz.

Cette dernière expérience ne me paraît pas juger la question. Elle montre simplement qu'il y a des différences dans la limpidité de ces eaux. En effet, si l'eau pure absorbe progressivement la lumière qui la traverse, plus l'eau est limpide, plus grand est le trajet que font les rayons lumineux avant de rencontrer une particule étrangère qui la réfléchisse, plus grande est l'absorption avant que la diffusion se fasse, plus faible est la quantité de lumière diffusée, et par conséquent émise par le lac. Une eau limpide est peu lumineuse, une eau opaque l'est beaucoup. S'il y a beaucoup de lumière réfléchie, cela prouve qu'il y a beaucoup de lumière diffusée, et par conséquent que cette eau contient beaucoup de poussières. Or, en réalité, on sait que le lac bleu de Kandersteg est, avec le lac bleu de Lucel, la masse d'eau la plus limpide de la Suisse ; le lac de Lucerne est de limpidité moyenne, le lac de Brienz a de l'eau presque louche.

Qu'il y ait des rapports entre la transparence des eaux et certains faits de leur coloration, cela me paraît incontestable. Dans le Léman, j'ai toujours vu en hiver, où les eaux sont le plus limpides, le bleu plus foncé, plus saturé, arriver quelquefois au n° III de la gamme ; en été, au contraire, dans ses eaux semi-opalines, le bleu se rapproche du n° V. D'une autre part, les lacs verts semblent moins transparents que les lacs bleus, toutes choses égales d'ailleurs ; c'est ce qui résulte des notes isolées que j'ai sur la transparence des eaux de divers lacs ; c'est ce qui résulte surtout de la comparaison très complète que nous avons pu faire de la transparence du Bodan et du Léman, ces deux lacs ayant

été étudiés par les mêmes méthodes. J'ai donné, page 440, les chiffres d'après lesquels, soit pour la limite de visibilité, soit pour l'obscurité absolue, on arrive à des valeurs deux fois plus profondes pour le même effet dans le Léman que dans le Bodan.

Je citerai encore dans cet ordre de faits les recherches de M. Krümmel dans l'Atlantique qui ont fourni comme profondeur moyenne de la limite de visibilité des chiffres plus forts dans les eaux bleues que dans les eaux verdâtres (1) :

Pour le n°	I gamme Forel,	limite de visibilité 26.7m
	II	23.2
	III et IV	16.2
	V et VI	15.8

Il paraît donc probable qu'il y ait certaines relations entre la transparence et la nuance de l'eau ; que moins l'eau est transparente, plus elle a de tendance à virer vers le vert. Nous avons vu que la cause principale de l'opalinité de l'eau réside dans les poussières aquatiques ; par conséquent, la diffusion sélective de Soret, causée par ces poussières, joue un certain rôle dans la coloration de l'eau.

Mais est-elle seule en jeu ? En est-elle le facteur prédominant ? — Si le vert de l'eau est dû à des particules solides en suspension dans l'eau, une filtration soigneuse de cette eau verte devra la faire revenir au bleu. La question est d'intérêt capital ; c'est à l'expérience à y répondre.

J'ai soumis les eaux de divers lacs, différemment colorés, à une filtration très parfaite dans des conditions identiques de pression et de porosité du filtre. Pour cela, j'ai employé les filtres en porcelaine recuite, connus sous le nom de filtres Chamberland, qui arrêtent même les microbes ou leurs germes les plus ténus. J'ai disposé mon appareil de telle sorte que la pression de l'eau à filtrer fût toujours la même. Puis j'ai étudié les eaux ainsi parfaitement limpides dans un tube de Bunsen de 6m de long, et j'en ai apprécié la nuance à l'aide de la gamme de couleurs. Pour plus de précision, au lieu d'indiquer les couleurs en numéros de ma gamme, qui sont trop espacés, je les donne en tant pour cent de la solution jaune dans la solution bleue.

(1) [Loc. cit. p. 468]. Les observations de la *Gazette* semblent amener au même résultat.

J'ai obtenu les résultats suivants :

	Couleur de l'eau dans le lac.	Couleur de l'eau tube de Bunsen [1] après filtration.
Lac Léman	8-12	10-15-20
Lac de Bret	—	50-80-90
Lac de Neuchâtel	15	25-30
id.	30	35
Lac de Morat	70	40-50-60
Lac d'Annecy	12	20-25

De ces chiffres je conclus :

A. La filtration la plus parfaite n'enlève pas aux eaux naturelles leur couleur caractéristique. Dans le tube de Bunsen, les eaux ainsi filtrées sont ou bleues, ou vertes, ou jaunes. [2]

B. La cause prédominante de la couleur différente des diverses eaux ne réside pas dans des matières en suspension, mais dans des matières en solution.

C. En comparant les chiffres qui expriment la couleur des lacs Léman et de Morat, et les chiffres de la même eau filtrée et étudiée dans le tube de Bunsen, je vois que pour l'eau bleue du Léman, la nuance de l'eau dans le tube de Bunsen est plus verte que celle du lac ; que pour l'eau verte brune du lac de Morat, la nuance de l'eau filtrée est moins verte (ou moins jaune) que celle du lac lui-même. Il est donc

[1] Comme je l'ai dit, p. 466, ma gamme avec solution au 1 : 200e me donnait des tons trop élevés pour la comparaison avec les teintes très abaissées obtenues dans le tube de Bunsen. Je me suis servi dans ce cas d'une gamme avec des solutions au 1 : 300e.

[2] J'ai continué la même étude sur la couleur dans le tube de Bunsen de l'eau passée au filtre Chamberland, et j'ai obtenu pour diverses eaux la teinte exprimée en tant pour cent de solution jaune dans la solution bleue, l'une et l'autre au 1 : 300e. Je donne les valeurs extrêmes atteintes dans diverses expériences à des dates diverses, sur diverses eaux :

Eau distillée	25-40
Eau de pluie	50-60
Eau de fonte de neige	15-40
Eau de fonte de glaçons de la Morge	25-30
Eau d'une fontaine à Chigny sur Morges	15
Eau d'un puits à Chigny	25
Eau de Bret, canalisation de Morges	50-90
Eau de la Morge, rivière	50-100
Eau de l'Arve, rivière, à Carouge	27-30
Eau de la Broye, rivière, à Payerne	70

probable qu'il y a renforcement vers le jaune par les nombreuses matières en suspension dans l'eau du lac de Morat.

Cette troisième conclusion n'efface cependant pas les deux premières ; la cause du vert de certains lacs réside dans des matières en solution dans l'eau.

Quelles sont ces matières ?

Parmi les matières colorantes dissoutes dans l'eau, il y en a deux groupes qui peuvent être invoqués pour faire virer l'eau vers le vert.

Ou bien des sels de fer. Mais la chimie nous apprend que les oxydes de fer ne peuvent rester en solution dans une eau naturelle, qu'ils ne tardent pas à se précipiter et à se déposer sur le fond.

Ou bien des matières organiques. — Quelles sont les matières organiques dissoutes dans l'eau qui peuvent se trouver dans les lacs verts et non dans les lacs bleus ?

Ce pourrait être la matière colorante des végétaux, la chlorophylle. Mais est-elle soluble dans l'eau ? Puis, si elle est soluble, pourquoi serait-elle en plus grande abondance dans le lac de Morat que dans celui de Neuchâtel, et dans celui-ci que dans le lac Léman ?

Ce pourrait être les matières ulmiques, humiques, etc., du sol arable, qui sont si richement développées dans les marais tourbeux. Une expérience préliminaire me décide à chercher dans cette direction l'explication demandée.

Je prends un bloc de tourbe de la vallée de Joux, et je le mets infuser dans de l'eau. J'obtiens en quelques jours une solution colorée en jaune pâle. Je la filtre sur les bougies Chamberland, elle reste jaune comme de l'urine peu chargée. Je la mélange en doses progressives avec de l'eau du lac Léman et, en l'étudiant dans le tube de Bunsen, j'obtiens successivement des eaux de plus en plus colorées en vert qui m'offrent toutes les teintes des eaux du lac de Neuchâtel et de Morat.

Voici le résumé de cette expérience.

L'eau du lac Léman, filtrée. Teinte dans le tube de Bunsen, 10-15. [1] J'y ajoute dans un total de 5.2 litres des doses successives de 45 grammes d'eau de tourbe et j'obtiens :

1re dose	45gr sur 5200.	Teinte	20
2e	90		25-30
3e	135		40 (?)

[1] Exprimée en tant pour cent de solution jaune dans la bleue.

4e dose	180gr sur 5200.	Teinte	40
5e	225		50
6e	270		50
7e	315		60
8e	360		70
9e	405		70
10e	450		80

Ainsi donc, en ajoutant 450g d'eau de tourbe à 5650g d'eau du Léman, soit environ 8 %, je fais virer la couleur bleue primitive de cette eau à la couleur des eaux les plus vertes et les plus jaunes.

Un tel mélange est-il dans les choses possibles? N'aurions-nous pas là une eau en dehors de toutes les eaux lacustres connues? A cette question répond le calcul suivant :

Mon collègue, M. le prof. E. Chuard, de Lausanne, a analysé l'eau de tourbe qui m'avait servi dans cette expérience et y a trouvé :

Résidu fixe	174mg par litre
Mat. organiques	82 —

Laissons de côté le résidu fixe. A cette dose de matières organiques, les 450gr d'eau de tourbe que j'ai ajoutées à l'eau du Léman contenaient 37mg de matières organiques qui, réparties sur les 5.2 litres de l'eau du tube de Bunsen, représentent une surcharge de 7mg par litre de matières organiques.

Si j'admets que l'eau du Léman en contenait originellement sa dose normale, 10mg par litre [1], l'eau verte, nuance n° 80, en aurait contenu 17mg.

Cela ne me paraît pas impossible, mais au contraire très plausible.

Donc, il est possible de faire virer au vert l'eau naturellement bleue d'un lac en lui mélangeant une certaine quantité d'eau tourbeuse. Cela a-t-il lieu dans la nature? Est-ce une bonne explication des lacs verts?

La question doit être posée à la géographie : Y a-t-il plus de marais tourbeux dans le bassin d'alimentation des lacs verts que dans celui des lacs bleus? — La question est très simple, mais il est malaisé de lui donner une réponse précise. Dans nos pays alpins ou jurassiques, il y a partout des tourbières; leur proportion relative est difficile à éva-

[1] Voir plus loin, dans la chimie des eaux du lac.

luer. Puis il est des questions accessoires qui compliquent l'enquête. Les tourbières peuvent être plus ou moins délavées par les eaux d'infiltration; leur importance relative peut être plus ou moins grande par rapport au débit total des affluents, ou encore par rapport au volume total du lac. Les premiers documents que j'ai rassemblés, quoiqu'assez encourageants, ne m'amenaient pas à un résultat décisif.

Le Léman, lac bleu, a dans son bassin d'alimentation des tourbières dans la plaine du Rhône et sur les croupes des Alpes. Mais il semble qu'il en ait relativement moins que les lacs de Morat et de Neuchâtel et que les autres lacs verts du nord de la Suisse. La proportion des tourbières paraît peu considérable pour le Léman si on les compare avec la grande étendue des glaciers qui l'alimentent, et surtout avec le volume énorme de ses eaux.

Le lac d'Annecy, lac bleu, n'aurait pas ou n'aurait que très peu de tourbières dans son bassin, d'après M. A. Mangé, architecte à Annecy (1), tandis que le lac du Bourget, lac vert, en aurait relativement plus.

Le Benaco, aux splendides eaux bleues, a quelques tourbières autour des petits lacs de son bassin d'alimentation. Il y en aurait relativement plus dans le pays qui se déverse dans les lacs insubriens, Lario, Ceresio, Verbano. (MM. Pavesi et Taramelli, de Pavie.) (2)

Mais si ces appréciations peuvent être discutées, et si elles ne sauraient que difficilement être prouvées par des chiffres, il en est heureusement autrement du fait suivant, qui me paraît décisif. Dans les montagnes du Tyrol, au nord d'Innsbruck, deux lacs près voisins sont célèbres, l'un par ses eaux bleues, l'Achensée, l'autre par ses eaux vertes, le Tegernsée. J'ai demandé à M. le professeur Pfaundler, à Innsbruck, quelle est la nature du bassin d'alimentation de ces deux lacs; sa réponse a été très précise (3). Dans le bassin de l'Achensée, il n'y a pas trace de tourbières; le lac de Tegern en est entouré. C'est très clair, très net et très simple : le lac sans tourbières a des eaux bleues, le lac à tourbières a des eaux vertes. Ce fait géographique me paraît trancher la question, et je crois pouvoir conclure avec assurance : La cause principale qui fait virer au vert la couleur naturellement bleue de certains lacs réside dans le mélange d'une quantité suffisante d'eau ayant délavé les tourbières et s'y étant chargée d'acide humique.

Cette conclusion est à peu près la même que celle que Wittstein

(1,2,3) Communication personnelle.

avait déjà formulée en 1860; mais j'y suis arrivé par une recherche indépendante et personnelle et je la motive par des arguments nouveaux.

Telle est dans ses grands traits la réponse que je donne au problème des lacs verts et des lacs bleus : Les lacs bleus sont ceux dont les eaux ne contiennent que des sels incolores. Les lacs verts ont leurs eaux verdies par un mélange d'eaux jaunes contenant de l'acide humique, eaux de tourbières.

Mais j'ai à noter encore deux circonstances assez importantes qui modifient ces faits généraux :

La première se rapporte à la couleur de l'eau dans la région littorale des lacs bleus. Si dans le lac Léman, lorsque les eaux sont bien limpides et d'une couleur bleue incontestable, je place le miroir de Wittstein au bord du lac, et si j'étudie la couleur de l'eau dans un rayon horizontal, je la vois d'une belle teinte glauque, d'un bleu vert manifeste, exprimé par les nos V ou VI de ma gamme. De même si je cherche la couleur de l'eau sous un bateau à vapeur arrêté au débarcadère de Morges, par l'éclairage du soleil levant dont les rayons passent sous le corps noir du bateau, je vois à cette eau une nuance très différente de l'eau du plein lac. C'est de l'eau glauque, presque de l'eau verte. Si enfin je regarde à distance d'une hauteur voisine, du Crêt du Boiron, près Morges, par exemple, le lac agité par une brise légère, morget ou rebat, je distingue facilement la ligne du mont : la couleur de l'eau intervient assez puissamment dans la résultante qui donne la couleur de surface du lac, pour que je puisse dire que sur la beine l'eau est verdâtre, tandis qu'à l'eau bleue, au-delà du mont, l'eau est d'un bleu indigo.

C'est cependant toujours la même eau qui est en jeu, et si je l'étudie dans le tube de Bunsen, je lui trouve toujours la même nuance. L'eau de la beine est aussi bleue que l'eau du plein lac. Donc la teinte apparente verte n'est pas causée par la couleur propre de l'eau, mais par une coloration de la lumière qui la traverse. Le sol de la beine est gris jaunâtre ; éclairé par la lumière blanche du soleil, il réfléchit une lumière gris jaunâtre qui, illuminant l'eau bleue, la fait virer vers le vert.

Cette interprétation du phénomène est bonne ; elle demande cependant à être complétée. En effet, si je fais la même expérience sur le lac

bleu de Lucel, le miroir qui me montre le rayon horizontal est d'une splendide couleur bleue (nº III de ma gamme), imperceptiblement teintée de vert. Pourquoi le miroir montre-t-il une eau glauque sur la beine du Léman, une eau bleue sur le lac Lucel qui a une profondeur maximale de 4m seulement, et qui peut être comparé par son peu de profondeur à la beine du Léman? Pourquoi cette différence?

Je pourrais admettre que la couleur propre de l'eau du lac Lucel est un bleu encore plus pur que celui que je vois dans ce rayon horizontal; que si j'attribue à ce bleu vu dans mon miroir la teinte nº III, gamme Forel, si je pouvais la voir dans un rayon vertical, je lui trouverais le nº I, du bleu pur. Je préfère une autre interprétation du fait; je le rapporte plutôt aux différences dans la limpidité de l'eau.

L'eau du lac Lucel est l'eau la plus limpide qui jusqu'ici ait été étudiée; j'ai distingué nettement un papier blanc plongé sous l'eau à 60m de distance (p. 424); elle contient par conséquent un minimum de poussières en suspension. Par conséquent aussi, la lumière réfléchie par le sol ne trouve pas de poussières faisant écran pour l'arrêter et se diffuser à son retour; quelque grise, quelque jaune que puisse être cette lumière réfléchie, elle traverse l'eau et se disperse dans l'espace sans éclairer l'eau du lac: elle n'intervient donc pas par son mélange avec la couleur bleue de l'eau pour faire virer celle-ci du côté du vert.

Au contraire, dans le Léman, l'eau littorale renferme assez de poussières pour faire diffuser dans tous les sens la lumière réfléchie par le sol; cette lumière diffuse gris jaunâtre se combine avec le bleu de l'eau pour donner une résultante manifestement verte.

— Il est un lieu où, sans artifices particuliers, on peut admirer la couleur de ces eaux littorales : c'est la cascade du Rhône, à Genève. Voici la description que j'en donnais en septembre 1888 (1). « La chute du Rhône, sous le pont de la machine, à Genève, offre un spectacle des plus intéressants. Le débit du fleuve exige, en cette saison, la fermeture de la moitié du barrage; l'éclusier a, par une disposition fort heureuse des vannes, fait alterner les portes ouvertes avec les portes fermées, de telle sorte que le barrage présente aujourd'hui 18 orifices réguliers par où l'eau s'écoule, séparés par des cloisons larges et obscures. Il résulte de cette habile ordonnance des chutes, des jeux de lumière très curieux et brillants.

(1) Gazette de Lausanne, 4 octobre 1888.

La nappe du fleuve qui arrive au barrage est calme, et les portes ouvertes sont assez larges pour que les colonnes d'eau, en les traversant, ne se brisent pas dans leur chute ; elles tombent en masse, sous la forme de cônes tronqués de 2^m de hauteur sur 1^m de base, à surface extérieure unie. Cette égalité de la surface permet aux rayons lumineux de pénétrer librement dans l'épaisseur de l'eau qui, éclairée par derrière, dans les heures de la matinée, présente une riche illumination. Les dix-huit cônes d'eau en mouvement semblent des masses immobiles d'une glace bleuâtre, brillamment éclairée sous le tablier noir du pont. Ce bleu n'est pas le saphir foncé du Léman, vu dans la verticale, lorsque nous naviguons en bateau sur le lac : la couleur des couches superficielles est alors assombrie par le noir du fond du lac où la lumière ne pénètre point. Le bleu de la cascade de Genève est la teinte plus claire, plus lumineuse du rayon horizontal qui traverse une couche suffisamment épaisse des eaux légèrement opalines du lac : ce bleu, nous le voyons quand, en plein lac, nous regardons l'eau sur le miroir de Wittstein, ou bien lorsque nous plongeons la tête sous l'eau, dans la région pélagique, et qu'ouvrant les yeux, nous sommes entourés d'un espace indéfini coloré de l'azur le plus délicat et le plus doux. Pourquoi, dans ce cas, n'est-il pas teinté de vert, comme nous le voyons sur la beine sablonneuse de Morges ? c'est que le lit du fleuve, à Genève, recouvert de plantes aquatiques sombres, renvoie très peu de lumière, et que la couleur propre de l'eau en est très peu altérée.

Ces masses d'eau ne sont pas immobiles ; le jeu des courants n'est pas absolument régulier, et des ondes divergentes donnent à la surface conique un aspect mouvementé qui produit des effets chatoyants d'un éclat singulier. La masse est assez limpide pour laisser voir certains reflets du lit du fleuve recouvert d'un tapis de plantes vertes ; d'une autre part, par transparence, on aperçoit les piliers noirs du barrage qui, contrastant avec le vert, prennent des tons violacés. Le cristal bleu de la cascade est donc strié de lames fugitives verdâtres, noirâtres, violâtres, d'une douceur extrême. Le ton général pourrait être défini : celui de l'aigue-marine.

L'effet lumineux est renforcé par le contraste avec les écumes de la cascade. La masse d'eau s'émiette au pied de la chute en une mousse blanche comme neige, qui se soulève en gros bouillons entre les cônes d'eau bleue, qui se relève en vagues arrondies là où le fleuve reprend son cours. C'est une nappe violemment agitée de nuages d'argent qui

roulent tumultueusement au pied des colonnes azurines de la cascade. Plus bas, dans le cours du fleuve, les bulles d'air se dégageant, le bleu reprend sa puissance successivement et progressivement en donnant les teintes les plus délicates du myosotis ou de la turquoise.

Qu'un rayon de soleil vienne illuminer ce jeu mobile de couleurs, et le spectacle est aussi brillant que les plus brillantes scènes du paysage aquatique. C'est ainsi que l'art arrive à égaler, presqu'à dépasser les magnificences de la nature sauvage.

Un deuxième point, qui modifie l'explication que j'ai donnée de la couleur des lacs, c'est l'action des poussières organisées, colorées, qui, dans certains cas, ont un effet considérable. Je me bornerai à en citer trois exemples qui n'ont pas besoin d'autre interprétation.

1° Dans le port de Morges, nous voyons apparaître chaque année, au mois d'août, la *Pandorina morum*, petite algue globulaire de dimensions minimes, mais dont la multitude est telle, qu'elle donne à l'eau une couleur verte très caractérisée. Elle amène l'eau de la surface du port aux nos VIII ou IX de ma gamme. Cette apparition ne dure pas longtemps, une semaine à peine ; elle est très locale, mais elle est fort instructive. On voit fort nettement, dans ces traînées vertes, l'action des vagues et des courants qui accumulent en certains points une plus grande épaisseur de ces eaux surchargées d'algues ; on reconnaît la limitation bien marquée de ces colorations accidentelles dues à un organisme surajouté à l'eau, dont la couleur est fort différente. (1)

2° L'eau du lac de Bret, petit lac tourbeux, près de Chexbres, présentait, le 14 septembre 1886, une teinte brun rougeâtre très manifeste. Une pêche au filet de Müller m'y a montré une multitude d'algues écarlates, *Beggiatoa roseo-persicina*, dans sa forme de Zoogloaea (2). Leur nombre et leur éclat étaient suffisants pour expliquer le virage vers le rouge d'une eau qui, sans elles, eût été verte ou jaune.

3° L'eau du lac de Lugano était, du 7 au 11 septembre 1889, quand

(1) Cette accumulation en taches colorées des organismes aquatiques, je l'ai vue fort brillamment le 26 mars 1888, au large d'Oran, où des myriades de noctiluques faisaient, dans la mer indigo, de grandes surfaces orangées ; ces taches étaient aussi nettement limitées que l'est le pollen de sapins qui donne au Léman les taches jaunes connues sous le nom de fleur du lac.

(2) *J.-B. Schnetzler*. Matière colorante des eaux du lac de Bret. Bull. S. V. S. N. XXIII, 152, 1888.

nous l'avons étudiée avec nos collègues de la Société helvétique des Sciences naturelles, d'un vert clair, brillant, presque jaunâtre (nº VIII de ma gamme); elle différait manifestement de l'eau des lacs voisins, lac de Côme et lac Majeur, dont le ton, beaucoup plus sombre, avait une nuance plus bleue et était suivant mon estime des nºs VI ou VII. Si je fais intervenir la notion de transparence, j'ai l'explication de cette différence. Dans le Verbano, le 4 septembre, dans le Lario, le 6 septembre, la limite de visibilité était par 6m de profondeur; dans le Ceresio, le 8 septembre, la profondeur limite de visibilité était 3m; l'eau était presque trouble; une pêche pélagique m'a montré la cause de cette turbidité dans une multitude d'algues floconneuses, jaunâtres, qui faisaient virer au vert brillant, au vert clair, le vert glauque ou sombre des lacs insubriens. (1)

Ces trois exemples, que je pourrais facilement multiplier, suffisent à montrer que l'effet des poussières organisées peut être grand, et peut modifier dans divers sens la teinte fondamentale des lacs.

En résumé, la question de la couleur des lacs doit se résoudre dans les termes suivants :

I. La couleur fondamentale de l'eau pure est le bleu d'azur. Cette couleur n'est pas modifiée par la dissolution de substances incolores.

II. La teinte fondamentale de l'eau est modifiée par la solution dans l'eau de substances jaunâtres qui la font virer vers le vert. Dans les lacs de l'Europe centrale, c'est l'acide humique des eaux tourbeuses qui intervient et donne à l'eau des lacs une nuance bleu verte, glauque.

III. La nuance fondamentale de l'eau vire du côté du vert, du brun, du rouge, du jaune par la présence d'organismes végétaux ou animaux colorés qui se développent en nombre suffisant dans l'eau.

IV. Dans le rayon vertical, le ton de l'eau est assombri (relevé) par le fond noir des couches profondes non éclairées du lac.

V. Le ton de l'eau est abaissé, éclairci par la présence dans l'eau de poussières organiques, ou d'organismes incolores, qui font diffuser la lumière en opalinisant l'eau.

VI. Dans les eaux peu profondes, la couleur du sol éclairé intervient

(1) Actes de Lugano S. H. S. N. p. 39. Lugano 1889. — Archives Genève, XXII, 373, 1889.

pour altérer la nuance de l'eau, en la faisant notamment virer vers le vert dans les lacs bleus. Cette action est d'autant plus évidente que les eaux sont plus chargées de poussières.

VII. L'alluvion impalpable des eaux torrentielles qui reste en suspension à la surface du lac y forme des taches colorées, limitées, verdâtres, jaunâtres, dont la couleur divergente s'atténue à mesure que l'alluvion se précipite, ou que ces eaux se mélangent avec la grande masse du lac.

VIII. L'éclairage enfin modifie le ton de l'eau : sous l'ombre d'un nuage, l'eau est plus sombre que dans la partie éclairée par le soleil. Cet effet est d'autant plus sensible que les eaux sont plus opalines ou troubles.

III. PHÉNOMÈNES DE RÉFLEXION

Nous décrirons, sous ce titre, la couleur superficielle du lac et les images qui contribuent à la produire ; puis quelques apparitions qui se développent à la surface de l'eau.

I. Couleur superficielle. Couleur apparente.

Si de la rive, ou à distance, nous regardons le lac, nous le voyons comme une grande surface colorée de nuances, de teintes et de tons très différents suivant les circonstances. Son apparence n'a rien de constant ; une diversité très mobile s'observe d'un jour à l'autre ; c'est peut-être ce qui fait le plus le charme incontestable des paysages lacustres ; c'est cette variété toujours nouvelle d'aspects, sans cesse changeant, et toujours intéressants.

Trois facteurs entrent en jeu dans ces changements incessants de ce que nous appelons la couleur superficielle et, par leur combinaison à chaque instant modifiée, donnent ces mille tableaux qui nous fatigueraient, si au lieu de les admirer, nous voulions tous les décrire. Ce sont :

1° L'état de calme ou d'agitation de la surface.

2° L'état du ciel et de la lumière.

3° La couleur propre de l'eau.

1° *L'état d'agitation de l'eau.* Si le lac est parfaitement calme, il fait l'office d'un miroir et réfléchit dans sa glace les montagnes de la rive opposée et le ciel. Si le calme est absolu, si le lac est plat comme un miroir suivant l'expression populaire, si pas une ride ne vient agiter la surface plane de l'eau, comme cela a lieu souvent sur des lacs plus petits, et comme cela s'observe parfois sur le Léman, l'image est très nette et très fidèle. Nous voyons la côte opposée, ses accidents et ses détails, les blancs clochers de ses églises, et la silhouette de ses montagnes. Cette image peut même être assez précise pour que nous puissions observer la déformation singulière des objets réfléchis à l'horizon que je décrirai sous le nom d'images de Ch. Dufour, dans un paragraphe subséquent.

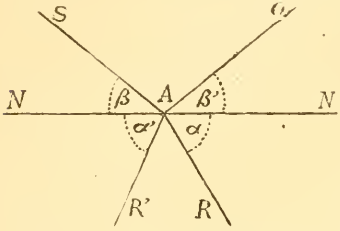
Ce cas est très rare, et même par le grand calme de l'air, ordinairement le miroir du lac est plus ou moins altéré dans sa tranquillité optique. Quelques lames mortes provenant d'un coup de vent dans une région quelconque du lac, les vagues d'un bateau à vapeur qui a passé au près ou au loin, ou le sillage d'une simple péniche, suffisent pour altérer un peu l'image de réflexion, pour éteindre la netteté des contours, pour voiler l'éclat du miroir. Mais la couleur générale est toujours respectée, et quand même les détails ne sont plus discernables, le lac nous montre alors sa large nappe divisée en deux par une ligne ondulée : l'une à l'horizon, violacée ou de teinte neutre, représente la côte opposée et l'ombre de ses montagnes; l'autre à nos pieds, bleuâtre, blanchâtre ou jaunâtre, est l'image du ciel bleu, si pâle à l'horizon, dans nos climats brumeux.

Mais aussitôt que le moindre souffle de vent vient rider la surface de l'eau, le spectacle change absolument. La rive opposée disparaît dans l'image du lac, et celui-ci prend une teinte générale, bleue, blanche, violacée, noire, suivant les circonstances. La surface de l'eau ne représente plus un miroir, mais une multitude de surfaces courbes, orientées suivant mille plans différents, dans des directions générales cependant à peu près les mêmes. Les rayons visuels jouent, de façons fort diverses, sur ces miroirs.

En effet, si le rayon visuel vient frapper une surface limite de deux milieux transparents, diversement réfringents, l'optique nous apprend qu'une partie du rayon est réfléchie, que l'autre est réfractée. Une partie est réfléchie suivant la loi que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence; l'autre est réfractée : le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport tou-

jours le même entre deux substances réfringentes données, ce rapport étant connu sous le nom d'indice de réfraction.

Soit NN (fig. 121), la surface de l'eau. Une partie seulement du rayon incident SA arrive à l'œil sous la forme de lumière réfléchie $A\ O$; l'autre pénètre dans l'eau sous forme de lumière réfractée AR et illumine les couches supérieures du lac. (1)



(Fig. 121.) Rayons réfléchis et rayons réfractés.

Mais cette dernière, la lumière réfractée, revient cependant à l'œil d'une autre manière. Ces couches supérieures illuminées renvoient de la lumière diffuse, et chaque rayon de celle-ci est réfracté à la sortie de l'eau. Le rayon $R'A$ sera réfracté à son entrée dans l'air et arrivera en AO dans la direction de mon rayon visuel. Or les angles α et α', β et β' sont égaux ; on peut donc admettre que, dans le rayon qui arrive à l'œil, il y a la même proportion de lumière émise, venant des couches éclairées du lac, que le rayon incident en avait perdu par réfraction, lors de la réflexion sur la surface de l'eau. Par conséquent la somme des quantités de lumière, réfléchie et réfractée, est toujours la même, et est égale à la quantité de lumière incidente (2). Mais si la somme est toujours la même, la proportion de ces deux valeurs varie suivant l'angle d'incidence ; la quantité de lumière réfléchie décroît, la quantité de lumière réfractée croît à mesure que l'angle d'incidence devient plus grand. Quand l'angle d'incidence est très petit, quand le rayon visuel arrive en rasant presque la surface limitante, le rayon est tout entier ou presque tout entier réfléchi, la quantité réfractée est nulle ; la surface limitante fait l'office d'un miroir et nous ne voyons rien du corps sur lequel vient se faire la réflexion. Quand au contraire l'angle d'incidence est très ouvert, qu'il se rapproche de l'angle droit, la réflexion est presque nulle, et tout le rayon pénètre dans la profondeur. L'on ne voit dans l'eau que les

(1) Qu'on me le pardonne ! J'ai appelé ici angle d'incidence, ce qui, dans le langage ordinaire de la physique, est le complément de cet angle.

(2) Cette expression n'est pas tout-à-fait exacte. Il y a toujours une certaine quantité de lumière absorbée, ou si l'on veut éteinte, soit dans le phénomène de la réflexion, soit dans le passage à travers une couche d'eau de la lumière réfractée. Cette quantité est relativement faible, et pour le sujet qui nous occupe, il nous est permis de n'en pas tenir compte.

objets situés au-dessous du bateau, et c'est dans ces conditions qu'il faut se placer pour voir, à l'eau bleue, la belle couleur azur de l'eau du lac. De la terrasse de Glion, sur Montreux, à 300m au-dessus du lac, le regard va plonger dans les eaux bleues du lac à 600m environ de distance horizontale. Le rayon réfracté fait donc un angle de 30° environ avec l'horizon ; dans ces conditions, la lumière émise par l'eau arrive en quantité assez considérable pour être parfaitement visible et reconnaissable.

Signalons encore un point intéressant dans cette superposition de lumière réfléchie par la surface, et de lumière émise venant de la masse même de l'eau. On peut dire que la lumière réfléchie plus brillante éteint la lumière émise moins intense ; s'il n'y avait pas de lumière réfléchie, la lumière émise apparaissant seule dans toute sa gloire et sa beauté, nous verrions la couleur propre du lac. Or c'est le cas lorsque nous sommes placés de telle manière que nous regardons, sur la surface du lac, l'image réfléchie d'un corps sans lumière, tel que la coque noire d'une barque ou d'un bateau à vapeur (1). Alors ces taches sombres ne nous envoient que peu ou pas de lumière réfléchie ; nous ne voyons que la couleur propre de l'eau, et l'image de ces masses noires nous paraît bleue. Telle est encore la vue de l'eau lorsque nous nous penchons en dehors du bateau et que nous regardons au-dessous de nous ; le ciel éclatant qui nous domine se réfléchit à la surface de l'eau et mêle sa teinte à celle du liquide, mais l'image de notre tête, mal éclairée, émet si peu de lumière, que dans son ombre nous ne voyons que la couleur de l'eau.

Quand il fait des vagues, nous nous trouvons, si nous regardons la surface du lac, en présence de petites surfaces réfléchissantes et réfractantes, orientées dans des plans fort différents selon la grandeur, la forme et la direction des vagues. L'angle sous lequel le rayon visuel rencontrera ces surfaces sera très différent, suivant la forme de la vague, suivant aussi qu'il atteindra la face antérieure, la face postérieure, le creux ou le sommet de la vague, suivant qu'il frappera la vague parallèlement, obliquement ou perpendiculairement à sa ligne de faîte ; il s'en suit que selon ces circonstances, une plus ou moins

(1) Lorsque la distance qui nous en sépare n'est pas trop grande, le feuillage sombre des sapins peut produire le même effet. Par certains éclairages, les sapins des monts de Lavaux ou de la cote de Meillerie, vus du bateau qui longe la rive, donnent une image bleu-noirâtre.

grande quantité de lumière sera réfractée ou réfléchie, et que l'effet général en sera fort différent.

Les faces des vagues ne sont jamais très inclinées, mais elles le sont cependant parfois assez pour que le rayon visuel puisse, en frappant convenablement l'une des faces de la vague, faire avec la surface limite un angle assez ouvert pour qu'il soit en grande partie réfracté ; dans ce cas, le rayon visuel pénétrant dans l'intérieur de la vague, notre œil voit en ce point la couleur bleue de l'eau. Quand l'œil peut ainsi voir sur un nombre de points suffisant la couleur même de l'eau, la surface du lac nous apparaît d'un bleu plus ou moins brillant. Ce cas de la réfraction du rayon visuel, soit de la vue de la couleur propre du lac, alors même que nous le regardons de la rive suivant un angle presque tangent, a lieu lorsque les vagues et rides sont aiguës ou vives, et quand leurs crêtes sont perpendiculaires, ou à peu près, au plan vertical de la vision.

Même dans le cas dont je viens de parler, une certaine quantité des rayons visuels sont réfléchis sur des surfaces frappées par eux sous des angles trop aigus. La couleur du lac est alors altérée et mélangée d'une proportion plus ou moins forte de couleurs provenant de la réflexion du ciel ou de la côte opposée.

Le plus souvent, c'est la réflexion qui domine, et alors notre œil voit sur les différentes surfaces des vagues tous les objets dont l'image peut arriver à lui : côte opposée, ciel, nuages, tous mêlés, confondus ensemble et donnant une couleur résultante, légèrement azurée par quelques rayons réfractés dans l'intérieur de quelques vagues.

Analysons de plus près la réflexion sur les vagues.

Ce sujet a été traité magistralement, en 1889, par mon ami le professeur Dr J. Piccard, à Bâle [1] ; il a cherché la forme et les dimensions de l'image résultante de la tache constituée par l'ensemble des images partielles d'un point lumineux réfléchi par les vagues mortes d'un lac agité. Il a reconnu qu'en général la tache lumineuse, ainsi formée sur l'eau, est de forme ovalaire, allongée verticalement.

Je ne puis que renvoyer, pour le développement, les formules et valeurs numériques, à ce beau mémoire qui est bien près d'épuiser la question. J'essaierai cependant d'en extraire les conclusions princi-

[1] *J. Piccard*. Phénomènes de réflexion à la surface des nappes d'eau. Arch. XXI, 481. Genève, 1889.

pales qui sont d'un intérêt pratique pour la compréhension du paysage lacustre.

I. Considérons d'abord un point lumineux A, et un observateur A', à même hauteur au-dessus de la nappe du lac ($h = h'$).

a. La tache lumineuse d'un point lumineux, réfléchi par un lac agité, occupe sur l'eau une surface ovalaire dont l'axe longitudinal est toujours plus long que l'axe transversal.

b. Si h est très peu considérable, si les angles d'incidence et de réflexion sont faibles, la longueur de la tache lumineuse est énorme ; elle est presque égale à la distance qui sépare A de A' ; à mesure que h augmente, la longueur de la tache lumineuse diminue ; elle atteint un minimum puis augmente de nouveau.

c. La largeur de la tache lumineuse augmente à mesure que h augmente. Pour des angles de réflexion très faibles, la largeur est très faible aussi.

d. Le rapport entre le grand axe et le petit axe de l'ovale va en augmentant à mesure que la valeur de h diminue.

e. Un point lumineux à l'horizon, vu par un spectateur au bord du lac, donne une tache lumineuse presque linéaire, très allongée dans le sens vertical. — Pour une élévation de 2^{m} au-dessus de l'eau et une distance horizontale de 10 ^{km}., le sillon lumineux produit par la réflexion d'un point est 14 000 fois plus long que large ; en perspective la proportion est encore de 120 fois. C'est dans cet allongement énorme des images, dans le croisement de ces traces verticales avec les lignes horizontales résultant de la perspective, que réside, d'après Piccard, un des caractères essentiels et le charme du paysage lacustre, en produisant une impression de transparence et de limpidité.

f. La tache lumineuse est vue par nous obliquement ; elle nous apparaît donc en raccourci. Or quelle que soit sa longueur réelle, elle arrive à l'œil en soustendant un angle visuel toujours le même, égal au double de l'angle d'inclinaison maximale des vagues.

g. Ces taches lumineuses ovalaires sont vues en perspective : la plus grande largeur apparente a lieu en un point plus rapproché de l'observateur que le petit axe de l'ovale.

h. Malgré le raccourcissement considérable de la longueur de la tache ovalaire vue en perspective, la forme apparente de l'image reste toujours un ovale allongé dans le sens vertical.

i. Le maximum de luminosité de la tache est au point où se ferait la

réflexion sur un lac calme : en vue perspective, ce point paraît plus éloigné que le centre de la tache apparente ; par conséquent la tache lumineuse est plus brillante dans ses parties éloignées que dans ses parties rapprochées.

II. Si la hauteur au-dessus de l'eau du spectateur est différente de celle du point lumineux, le problème se complique notablement, et nous devons renvoyer au mémoire original ; j'en tirerai cependant encore deux conclusions intéressantes :

k. Si l'œil voit des objets diversement élevés au-dessus de l'horizon, les objets inférieurs donnent des taches lumineuses plus étroites, les plus élevés des ovales plus larges et aussi sensiblement plus allongés ; les objets à l'horizon donnent des images nettes et peu élargies, les objets plus élevés des images plus épatées, plus diffuses.

l. La position apparente du point de luminosité maximale de la tache permet de diagnostiquer la hauteur relative d'un corps lumineux invisible dont on ne voit que la réflexion sur les vagues d'un lac. Si le spectateur est plus bas que le corps lumineux, le maximum de luminosité est rapproché ; il est éloigné si le spectateur est dans une position plus élevée que l'objet éclairant.

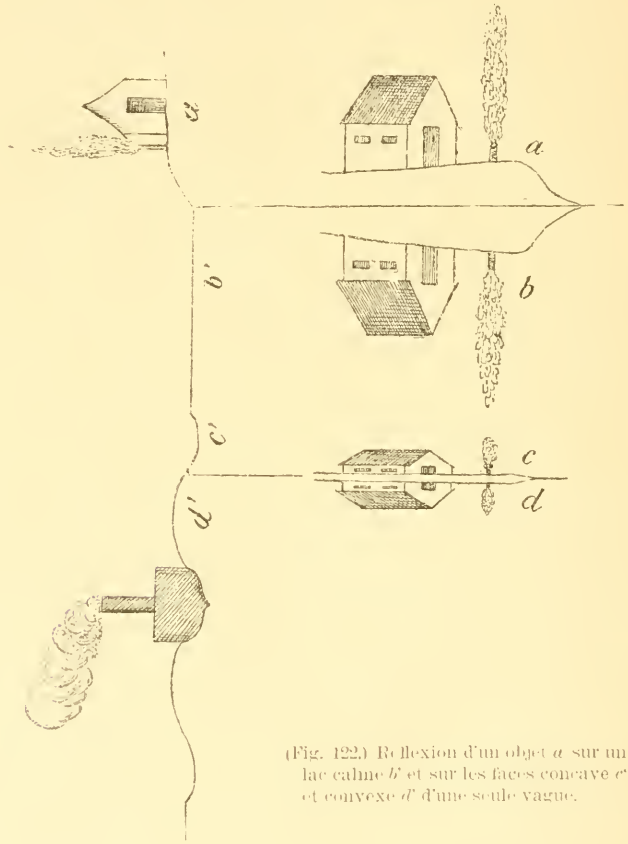
m. Les taches lumineuses de deux objets voisins se recouvrent en partie ; de là les couleurs résultantes données par la réflexion de surfaces sur un lac agité.

Cette dernière conclusion, je la traiterai d'une autre manière que mon ami de Bâle, et j'arriverai au même résultat que lui. J'analyserai non pas l'ensemble de la tache lumineuse, mais chacune des étincelles données par la réflexion : je considérerai l'image formée sur chacune des vagues isolées et représentant un miroir à surface courbe.

Les faces des vagues ne sont point planes ; leur creux est toujours arrondi, leur sommet n'est qu'exceptionnellement aigu. Ordinairement les vagues représentent des surfaces cylindroïdes, alternativement convexes dans leurs sommets, concaves dans leurs creux. La réflexion sur des surfaces courbes de corps éclairés, vus suivant un angle très peu ouvert, donne des images virtuelles déprimées dans le sens perpendiculaire à l'axe du cylindre. Ces images déprimées sont du reste différentes suivant qu'elles se forment sur un miroir convexe ou sur un miroir concave. Dans le premier cas, l'image est renversée, dans le second cas, l'image est redressée. Il résulte de cela que sur chaque vague il se produit deux images très déprimées dans le sens

vertical ; chacune d'elle résume sur la très faible largeur d'une demi vague tout le paysage situé au-dessus de l'eau, la côte opposée, le ciel de l'horizon, le ciel du zénith ; ces deux images sont l'une redressée, l'autre renversée, et se touchent par le pied.

J'ai étudié facilement ces images dans les conditions suivantes. Un bateau à vapeur, qui navigue sur le lac parfaitement calme, soulève dans sa progression une large vague de refoulement, à surface unie, qui accompagne le bateau dans sa marche ; l'observateur placé sur le bateau a devant lui une vague qui semble immobile. Il peut constater



(Fig. 122.) Réflexion d'un objet *a* sur un lac calme *b'* et sur les faces concave *c'* et convexe *d'* d'une seule vague.

à loisir la réflexion du rivage sur les flancs de cette vague, et noter une triple image réfléchie de l'objet *a* (fig. 122) placé sur la terre ferme.

En *b* réflexion sur le lac calme, *b'* faisant miroir plan, image virtuelle renversée, de grandeur naturelle.

En *c* réflexion sur la partie concave *c'* de la vague de refoulement, image virtuelle redressée et déprimée.

En *d* réflexion sur la partie convexe *d'* de la vague, image virtuelle renversée et déprimée.

Si l'on veut vérifier ces interprétations, que l'on courbe, en l'ondulant convenablement, une feuille de fer-blanc poli en produisant à sa surface les incurvations alternativement concaves et convexes d'une vague, et que l'on regarde la réflexion des objets qui se mirent très obliquement sur l'étain brillant.

Chaque vague donne donc une double image de la rive et du ciel. Le détail de ces images disparaît pour l'observateur qui les contemple à distance ; seule l'impression de couleur arrive à son œil, et le spectateur a une impression lumineuse générale, résultant des différentes couleurs juxtaposées dans chacune des images partielles.

Mais dans les images déprimées qui se forment à la surface des vagues, la côte opposée joue un très petit rôle ; elle est réduite à une bande très étroite : c'est le ciel susjacent, de l'horizon au zénith, qui forme la plus grande partie de l'image. Il en résulte que c'est la couleur du ciel qui est de beaucoup la dominante dans la couleur résultante apparente à l'œil.

Aussi le lac à l'horizon, lorsqu'il est ridé par les vagues, paraît-il bleu si le ciel est serein, blanc s'il est brumeux, gris et sombre s'il est nuageux.

C'est cette prédominance de l'image du ciel qui explique l'apparence étonnante que produit sur le lac un nuage sombre, une colonne de fumée, vus à quelques kilomètres de distance. Ils tracent sur le lac une bande noire dont l'intensité nous surprend. C'est que tandis que pour nous, à distance, ce nuage sombre que nous voyons par sa tranche nous apparaît comme un accident négligeable du paysage, pour les vagues situées au-dessous du nuage, celui-ci masque une notable partie du firmament : dans l'image composée que nous renvoie chaque vague, la masse sombre forme la dominante, et la couleur résultante nous arrive foncée, presque noire.

Il est un cas spécial de réflexion sur la surface des eaux qui présente un intérêt particulier. C'est l'image des grands astres, soleil et

lune, des grandes planètes, Vénus et Jupiter, ou simplement d'une lumière éclairant au milieu de la nuit.

On connaît ces brillantes traînées lumineuses, ces bandes d'étincelles sautillantes, réfléchies par la surface miroitante du lac agité. Ce cumatage, comme on l'appelait autrefois [1], varie beaucoup d'éclat suivant l'état de la surface du lac. Il est causé en effet par la réflexion du point lumineux sur la surface des vagues; or celles-ci ne renvoient à l'œil l'image de l'astre que dans le point où le plan formé par le miroir est perpendiculaire au plan de réflexion arrivant à l'œil, l'angle d'incidence étant égal à l'angle de réflexion. C'est ce qui aurait lieu, d'après ce que nous venons de dire de l'image formée sur les surfaces cylindroïdes des vagues, pour toutes les vagues situées dans le plan vertical limité par les bords de l'astre, si les vagues avaient toutes leurs arêtes bien régulières, perpendiculaires à ce plan. Toutes les fois que l'arête des vagues lui est oblique, le plan de réflexion qui arrive à l'œil est dévié de la verticale, et l'image apparaît à droite ou à gauche de cette verticale. Or comme la régularité, le parallélisme absolu est l'exception dans le cas des vagues, comme il y a toujours — surtout lorsque les vagues d'un vent un peu violent se compliquent de rides superposées — de nombreuses déviations de la direction générale, il en résulte que les vagues, renvoyant l'image du corps brillant dans la direction de l'œil, s'éloignent plus ou moins du plan vertical et que la traînée lumineuse s'élargit. Quand le lac est très agité, par une bise violente, par exemple, la traînée peut prendre des dimensions considérables et soustendre jusqu'à 40 ou 50°.

Quand la surface du lac est ridée, par places seulement, par une brise légère, on reconnaît à distance la position de ces coups de vent par la traînée lumineuse qu'ils réfléchissent, et qui se détache nettement des places obscures où le lac est calme.

Quand la surface du lac est ridée par ces brises légères, dont les vagues sont bien régulières, on peut reconnaître à distance la direction des vaguelettes d'après la règle suivante : la traînée lumineuse est portée à droite du plan vertical de l'astre, lorsque les arêtes des vagues sont obliques de droite à gauche et d'avant en arrière ; elle est portée à gauche lorsque les vagues sont obliques en sens inverse.

[1] Ce mot a été retrouvé par M. H. de Parville (le Correspondant, Paris, novembre 1888). Il n'est donné ni dans le dictionnaire de l'Académie, ni dans Littré.

Les corps brillants, le soleil, la lune, une lumière artificielle, réfléchis à la surface du lac, semblent prendre dans leur traînée lumineuse une part plus considérable que celle qui leur revient, étant donnée la grandeur de leur image réelle. Cela s'explique par l'action d'irradiation, sur la rétine, des corps brillamment illuminés ; ils paraissent plus larges à angle égal que les corps sombres. Chacune des étincelles des reflets du soleil ou de la lune nous semble, chacune pour son compte, plus large, semble soustendre un angle plus ouvert que son dû ; chacune d'elles empiète sur les parties obscures. C'est si vrai que, à l'horizon, la traînée lumineuse du soleil semble une bande continue, où notre œil ne distingue plus les parties obscures, bien que celles-ci soient incomparablement plus larges que les étincelles éclairées. Si nous admettons que chaque vague donne une image de tout le paysage s'étendant de l'horizon au zénith, l'image du soleil ne représente que le 0.005, le demi pour cent de la surface ainsi réfléchie.

Ce qui prouve la justesse de cette application de la théorie de l'irradiation, c'est qu'on diminue notablement la largeur apparente des étincelles de la traînée lumineuse en la regardant à travers un verre coloré ou enfumé, qui éteint une partie de l'éclat des points brillants et les fait paraître moins considérables.

La réflexion sur la surface du lac est toujours accompagnée d'absorption, par réfraction dans l'eau, d'une certaine quantité de la lumière. Plus la réflexion s'opère suivant un angle aigu, plus elle est complète ; si l'angle d'incidence se rapproche de l'angle droit, l'absorption devient considérable. (1) Cela est si vrai que l'œil peut sans trop de fatigue regarder l'image du soleil lorsqu'il se réfléchit dans l'eau suivant un angle un peu ouvert. De là l'usage vulgaire qui fait observer les éclipses de soleil sur le miroir d'un baquet d'eau.

J'utilise avec succès cette propriété pour constater les couronnes et halos qui entourent le soleil, le cercle de Bishop qui a paru autour de l'astre après l'éruption du Krakatoa, en 1883, ou les nuages iridescents qui montrent les couleurs de la nacre à quelques degrés du soleil. Autant ces phénomènes colorés sont difficiles à regarder directement dans la région sur-éclairée qui avoisine l'astre, autant ils s'aperçoivent facilement lorsqu'on observe le soleil se réfléchissant sur l'eau du lac.

(1) Voir la note 1 de la page 489.

Je terminerai ce paragraphe sur les effets optiques de la surface du lac par une dernière observation. Le lac agité par des vagues présente à celui qui le contemple à distance une apparence de singulière animation. Les petits mouvements isolés de chacune des vagues se combinent pour l'œil avec ceux des vagues voisines et donnent l'illusion d'un mouvement d'ensemble. Il semble que l'eau s'écoule rapidement, comme celle d'un fleuve gigantesque, en un courant qui marcherait dans la direction du vent. Ce courant rapide est une illusion ; en réalité le courant superficiel causé par l'action du vent et qui avance dans la même direction, est infiniment plus lent que le mouvement apparent qui trompe l'œil : il échappe complètement à une observation faite ainsi à distance.

2° *L'état du ciel et la lumière.* Ce que nous venons de dire m'aidera à montrer l'importance de l'éclairage du ciel au point de vue de la couleur apparente du lac. En effet, la réflexion à la surface du lac est toujours un des facteurs les plus importants dans le mélange de cette teinte résultante qui donne la couleur superficielle ou apparente de l'eau ; c'est le facteur unique dans le cas d'un lac miroitant, c'est simplement un facteur principal dans le cas de la réflexion de la lumière sur les facettes des vagues. Or selon que le lac a à réfléchir un ciel bleu ou un ciel pâle, ou un ciel gris, ou un ciel noir, ou encore un ciel taché de nuages blancs, noirs, jaunes, violets ou rouges, chacune de ces teintes participant plus ou moins à l'image composite, suivant la hauteur et la direction de la partie éclairée ou sombre, suivant la forme et la direction des vagues, chacun de ces accidents de l'éclairage du ciel entre pour sa part dans la couleur apparente du lac.

Rien ne peut faire mieux voir l'importance du facteur qui nous occupe, que la contemplation de l'un de ces phénomènes de réflexion, du plus brillant de tous, cela est vrai. Que le soleil ou la lune, ou même que Jupiter ou Vénus viennent à promener leur disque brillant au-dessus d'un lac moiré par des vagues, chaque facette de vague qui sera inclinée de telle sorte qu'elle renvoie à notre œil le rayon lumineux qui vient de l'astre, réfléchira une étincelle, et ces myriades d'étincelles, disposées en traînée plus ou moins large, ou plus ou moins serrée, suivant la forme et la direction des vagues, formeront le plus gracieux, le plus éblouissant des spectacles.

Or chaque partie du ciel est réfléchie à notre œil de la même manière

que le sont les rayons brillants de ces astres; chaque partie du ciel prend donc sa part dans la composition de la teinte générale du lac.

L'éclairage du ciel entre encore en jeu d'une manière indirecte dans la composition de la teinte mixte de la surface du lac : c'est par son action sur la couleur et l'éclairage de la côte opposée. La côte opposée se réfléchissant sur l'eau est, comme nous venons de le dire, pour une part considérable dans la couleur apparente du lac, part d'autant plus grande que, la côte étant à l'horizon ou près de l'horizon, son image est réfléchie par un plus grand nombre de vagues. Or la nuance et le ton de la côte opposée dépendent pour beaucoup de l'état du ciel et de l'éclairage, de son état plus ou moins nuageux, etc.

Il est encore un point important, dans lequel la couleur apparente du lac est influencée par l'état du ciel, de la lumière, par l'éclairage de la côte opposée. Ce sont les faits de contraste simultané des couleurs. On sait combien la coloration d'une surface juxtaposée à une autre agit sur l'impression physiologique causée par la nuance que l'on considère; certains voisinages relèvent, d'autres dépriment certaines couleurs (1). Une bonne partie des effets de la peinture artistique sont basés sur cette action des contrastes.

Or la nature est un puissant peintre; ses plus belles œuvres sont les paysages où l'eau entre avec prédominance en scène; ses maîtres chefs-d'œuvre sont, nous le prétendons du moins, les grands tableaux panoramiques du Léman.

Elle y met en activité toutes les ressources de la palette la plus savante. Dessin et modelé des contours, belle ordonnance des formes, perspective aérienne qui dispose à leur rang les plans successifs, jeux d'éclairage, jeux de lumière, jeux de couleurs; tout s'y harmonise, tout prend sa part à la fête de ces magnificences. Les contrastes de

(1) Je citerai un seul exemple de ces effets de contraste. Par un beau soir de printemps, le 24 juin 1889, je naviguais en bateau à vapeur entre Vevey et Ouchy; la côte élevée de La Vaux se réfléchissait sur un lac plat comme un miroir. Dans cette image réfléchie, où tous les détails avaient leur place, les surfaces vert-clair de la vigne qui poussait ses jeunes pampres prenaient une importance étrange; elles paraissaient plus vertes que nature. Je m'expliquai le fait lorsque j'eus fait la remarque que les murs noirs, les pierres sombres, tous les objets foncés émettant peu de lumière se réfléchissaient mal dans l'eau, et laissaient voir à leur place la couleur propre de l'eau, comme je l'ai dit plus haut; toutes les ombres étant bleuâtres, les parties vertes, bien éclairées, étaient rehaussées dans leur éclat par effet de contraste, et faisaient saillie avec plus d'intensité que dans l'image réelle.

couleur sont certainement un des moyens les plus décisifs qui donnent au paysage sa variété et son intensité d'effet.

Il est difficile, il est impossible de décrire ces artifices de la lumière ; l'analyse d'impressions aussi subtiles, qui ne sont presque que des émotions, échappe à la paresse de la plume. Pourquoi le même bleu est-il aujourd'hui plus délicat et plus tendre ? Pourquoi était-il hier plus vif, plus joyeux ? Pourquoi sera-t-il demain plus sombre ? Pourquoi telle teinte violâtre de la côte de Savoie fait-elle virer le même lac, ridé par la même brise, vers les teintes de l'aigue-marine, tandis qu'un ciel bleu-méditerranéen lui donnera les nuances de la turquoise ? Un nuage d'orage assombrit la rive opposée, et trace une bande noire sur la moitié éloignée du Léman : au-devant, le soleil éclaire les eaux qui prennent les tons du myosotis. Une heure après, le voile a recouvert notre côte, et la bande littorale, illuminée par la lumière du zénith, apparaît violacée ; le lac à l'horizon semble alors presque vert. C'est la même eau, c'est la même lumière, c'est le même vent qui trace sur le miroir les sillons parallèles de ses vagues, et cependant la couleur apparente diffère autant que l'eau verte du lac des Quatre-Cantons est autre que l'eau azurée du lac de Garde ; le secret magique qui fait ces changements à vue, c'est le contraste des couleurs adjacentes. Les lacs les plus étranges, les plus intéressants — je ne dirai pas les plus beaux, car le triomphe du Léman, c'est la grande sérénité des beaux jours d'automne et d'hiver — les lacs les plus variés et les plus curieux sont ceux des jours d'orage où les contrastes de lumière sont le plus diversifiés et renouvellent la scènerie comme sous les ordres d'une baguette enchantée.

Je dois indiquer en terminant une cause importante de variation dans l'impression colorée que nous donne la surface du lac, c'est l'état physiologique de notre rétine. Si, enfermé dans la chambre où je travaille actuellement, j'ai pendant des heures été reposé par les tons verts et peu lumineux des arbres d'un jardin, si j'arrive subitement en face du lac éclairé par un beau soleil, je suis ébloui par l'intensité de son azur et le Léman me paraît plus bleu que jamais. Mais cette impression du premier instant ne dure pas ; bientôt ma rétine se fatigue ou s'habitue à la lumière bleue, et dans le même lac qui m'avait étonné quelques instants auparavant, je retrouve les teintes et les tons qui me sont familiers. Cette transformation de l'impression subjective est remarquablement rapide.

3° *La couleur propre de l'eau.* Nous devons déduire de notre premier facteur, soit l'état d'agitation de l'eau, l'importance de ce troisième facteur, la couleur propre de l'eau ; lorsque les vagues sont assez vives et qu'elles sont dans une direction convenable pour que le rayon visuel ne soit pas entièrement réfléchi sur leurs faces miroitantes, mais pour qu'il pénètre dans l'intérieur de la vague, alors la couleur même de l'eau entre dans la composition de la couleur superficielle du lac. Un lac aux eaux vertes, agité par la bise, apparaît vert vu de la rive. Le Léman apparaît dans ce cas d'un bleu d'azur.

Si l'on veut se rendre compte de cette action, que, par un lac agité, on navigue en pleine eau, et qu'on regarde du pont d'un bateau la surface de l'eau à quelques mètres seulement de distance. On verra distinctement sur la face antérieure des vagues ou des rides, sur la face inclinée vers le spectateur, la couleur propre du lac émise par l'eau, sur la face postérieure l'image de réflexion, les teintes du ciel ou des nuages qui s'y reflètent. La couleur apparente à distance résulte de la combinaison de ces deux couleurs composantes. Nous avons à signaler cependant quelques cas particuliers :

1° La nuance de l'eau du lac varie notablement suivant qu'elle est éclairée par la lumière directe du soleil, ou par la lumière diffuse seulement. Le soleil lui donne une teinte beaucoup plus claire, beaucoup plus gaie que la lumière diffuse, sous laquelle le lac est plus foncé, plus violet. C'est ce que l'on reconnaît par un jour de bise lorsque le lac est d'une couleur superficielle d'un bleu de turquoise ; si un nuage traverse le ciel et vient porter son ombre sur le lac, celle-ci se dessine comme une tache sombre, violacée, à bords très nets et bien tranchés.

2° Nous avons, dans l'étude de la couleur propre de l'eau, montré quelles sont les variations saisonnières ; comment le lac est plus limpide et d'un bleu plus sombre en hiver, plus opalin et d'un bleu plus clair en été. Ces variations de teinte se manifestent avec grande évidence dans la couleur apparente du lac, dès que, par les rides des vagues, la couleur propre de l'eau intervient dans la résultante générale. Les bleus sont plus adoucis, moins crus en été qu'en hiver.

3° Quand une pluie d'orage a sali les affluents, leurs eaux troubles sont versées dans le lac et, si leur densité n'est pas trop forte, dans les mois du printemps, par exemple, elles s'étalent à la surface ; s'il fait des vagues, leurs eaux sont mélangées avec les eaux superficielles du lac ; elles forment devant les embouchures des rivières de larges

taches, de kilomètres d'étendue, qui jaunissent l'eau. Ces taches jaunâtres, en général fort bien limitées, se dessinent pour leur part dans la couleur apparente du lac. Au bout de quelques jours, l'alluvion grossière est descendue dans les eaux profondes, et il ne reste plus à la surface qu'une alluvion impalpable qui se mélange progressivement à la grande masse du lac sous le jeu des vagues et des courants, et rend l'eau opalescente, jaunâtre: Ces teintes jaunâtres qui se combinent optiquement au bleu propre du Léman, lui donnent des nuances verdâtres, aigue-marine, tout-à-fait remarquables. Quelques jours plus tard, il ne persiste plus qu'une très faible opalinité qui lave de blanc le bleu de l'eau, et lui donne, dans sa participation à la couleur apparente, des teintes de myosotis d'une délicatesse extrême.

4° Ces nuances bleu-myosotis ou turquoise, sont causées parfois aussi par les eaux troubles du Rhône, qui, comme nous l'avons vu page 280, peuvent être amenées à la surface par les courants de convection des grandes bises.

Ces faits généraux, et bien d'autres observations que la contemplation du lac fournit chaque jour, mais qu'il serait oiseux de multiplier ici, justifient les affirmations que j'ai énoncées sur l'intervention de la couleur propre du lac dans l'établissement de la résultante qui fait la couleur apparente. La couleur propre du lac entre pour sa part, en des circonstances déterminées, dans les variations de teintes que présente le lac considéré à distance suivant un rayon oblique ou tangent.

En résumé, la couleur apparente du lac, celle qui se montre à une vue rasante ou oblique, est la résultante d'un certain nombre de facteurs d'ordres très divers, tous variables dans leur action et dans leurs effets.

Le plus important, c'est l'état de la surface du lac, qui tantôt est calme et représente un miroir unique donnant des faits de réflexion relativement simple, qui le plus souvent est ridé par des vagues et représente alors un miroir composé. La forme des vagues, leur grandeur, leur direction, font varier considérablement les phénomènes de réflexion sur cette surface ondulée.

En même temps que les vagues modifient le phénomène de la réflexion, elles font pénétrer le rayon visuel dans la masse même de l'eau quand leur orientation est telle que les lignes de faîte soient à peu près perpendiculaires au plan de la vision; dans ce cas, la couleur

propre de l'eau intervient avec plus ou moins d'importance dans la composition de la couleur apparente.

Le second facteur est la couleur des surfaces réfléchies sur le lac, côte opposée et ciel bleu ou nuageux. — Le troisième facteur est la couleur propre du lac.

L'éclairage et l'intensité de la lumière, les effets de contraste ajoutent leurs actions, et modifient presque à l'infini l'impression physiologique que nous appelons la couleur apparente du lac.

Par la combinaison de ces différents facteurs, tous variables, nous voyons alterner sur le lac toutes les nuances, tous les tons, toutes les teintes de la gamme entière des couleurs. La teinte apparente du lac passe du blanc au noir et donne toutes les couleurs du spectre, plus ou moins relevées, plus ou moins rabattues. Je citerai des exemples de ces extrêmes de couleurs tranchées en indiquant leur mode de formation :

Le blanc vient de la réflexion sur un lac calme d'un nuage blanc ou d'une surface de neige.

Le noir est donné par la réflexion de masses sombres, qui paraissent noires par contraste avec un ciel éclairé (arbres verts qui font silhouette sur le ciel du couchant).

Le rouge, l'orangé, le jaune viennent essentiellement de la réflexion du ciel illuminé par les feux de l'aurore et surtout du couchant. Les tons rouges les plus intenses, nous les avons vus dans les embrasements crépusculaires qui ont apparu pendant les mois de novembre, décembre 1883 et janvier 1884, à la suite de la grande éruption du Krakatoa du 26-28 août 1883. ([1])

Le vert est donné, ou bien par le mélange d'eaux légèrement opalines, jaunâtres, avec le bleu du lac, ou bien par des effets de contraste qui font virer au vert le bleu mis à côté de masses violettes, ou bien par la coloration de l'eau par des algues vertes (*Pandorina morum*), ou bien encore par la réflexion à courte distance du vert de la végétation sur la côte opposée.

Le bleu et l'indigo sont dus à la couleur propre de l'eau du Léman ; ils sont renforcés par la réflexion d'un ciel d'azur.

([1]) Je dois à la libéralité de M. Hosch, le peintre verrier de Lausanne, une étude précieuse, peinte d'après nature, des feux crépusculaires de 1883. C'est la meilleure représentation que j'en connaisse. Les tons rouges y tiennent du vermillon et du carmin.

Le violet est dû au mélange de tons rougeâtres du ciel avec les tons bleus du ciel et du lac, ou bien à des effets de contraste avec des nuages sombres, ou enfin à la coloration de la côte opposée (grands paysages des beaux jours d'automne).

Que l'on étudie l'œuvre entière du peintre du Léman, F. Bocion, d'Ouchy, celui qui a le mieux compris et le mieux figuré les mille aspects de notre lac ; l'on retrouvera sur ces représentations fidèles de la couleur apparente du lac toutes les nuances, tous les tons, toutes les teintes, toutes les notes de la gamme des couleurs.

II. **Iris, spectre coloré étalé à la surface du lac.**

Lorsque les rayons solaires de lumière blanche sont réfléchis sur une lamelle transparente excessivement mince dont l'épaisseur est égale ou dépasse à peine la longueur d'une demi-onde lumineuse, il se produit une décomposition de la lumière, et l'on voit apparaître des couleurs irisées.

Le phénomène se manifeste dans toute sa beauté quand on verse à la surface de l'eau certaines substances huileuses, qui s'étalent rapidement en lame mince, mais qui gardent cependant une épaisseur suffisante. C'est l'essence de térébentine qui m'a donné les résultats les plus brillants. Les couleurs irisées dans lesquelles toutes les nuances du spectre solaire se peignent avec un éclat admirable illuminent cette pellicule mince, en y dessinant des figures irrégulières à contours arrondis, suivant les accidents qui augmentent ou diminuent l'épaisseur de la lamelle huileuse. Ces couleurs persistent tant que la couche huileuse a une épaisseur suffisante ; elles disparaissent sur les bords de la tache où la pellicule est trop amincie.

La demi-onde lumineuse a une longueur de 212$\mu\mu$ (millionnièmes de millimètres, micromillimètres) pour le violet, de 310$\mu\mu$ pour le rouge (0,000 212 — 0,000 310^{mm}).

C'est ce qui explique pourquoi les couleurs irisées ne sont pas visibles dans les taches d'huile naturelles, les fontaines du lac Léman, où la couche huileuse est prodigieusement mince, — 1/200 000e de millimètre, 0,000 005^{mm}, 5$\mu\mu$ d'après mon évaluation, — de 2 à 120$\mu\mu$

d'après différents auteurs [1]. La pellicule a beaucoup moins d'une demi-longueur d'onde et la décomposition de la lumière blanche ne peut pas se produire.

Une apparition de couleurs irisées analogues à celles que nous produisons artificiellement en versant de l'essence de térébentine sur l'eau, a été observée à plusieurs reprises sur le lac. Wartmann lui a donné le nom d'*Iris*.

E. Wartmann en a décrit un premier cas observé près de Genève le 2 novembre 1868. [2]

Un second exemple a été vu par le même observateur le 11 février 1872, au bord de la côte de Cologny, près Genève [3]. « A 2 heures 5 minutes, étant au bas de la côte de Cologny, j'aperçus en plein lac, à environ deux kilomètres et demi vers le N.-N.-O., un spectre très lumineux étalé en ligne droite sur la surface de l'eau et présentant le rouge du côté du soleil comme l'arc-en-ciel intérieur. Continuant à marcher vers le Nord, je ne tardai point à voir paraître un second spectre parallèle au premier dont il était séparé par un espace sombre et incolore. Bientôt un troisième iris, encore plus rapproché de moi, et parallèle aux deux autres, vint enrichir ce spectacle. De 2 à 3 heures, les iris se développèrent en se modifiant. »

A trois heures, voici la description du phénomène. « Un premier iris se dessinait à mille mètres dans la direction du Nord. A 5^m de moi, deux arcs irisés dessinaient les sommets de leurs branches elliptiques séparées de 7 à 8^m. Nées à ma gauche d'une base commune, ces branches se contractaient sensiblement à mesure qu'elles se rapprochaient, et tournant à droite, elles allaient se rejoindre à 130^m de distance. L'ombre produite par un bâton vertical coïncidait avec le grand axe commun des deux branches. La clarté de la branche extérieure l'emportait sur celle de sa voisine. Toutes deux avaient le violet en dedans ; cette couleur était remarquablement vive et saturée. A mesure que l'œil parcourait leur développement à de plus grandes distances, ces arcs augmentaient d'éclat et paraissaient se dilater. Au N.-E., vers leur terminaison la plus éloignée, ils étaient semblables à des miroirs métalliques sur lesquels toutes les teintes du spectre flamboyaient avec une

(1) Voyez, ci-dessus, page 246.

(2) Arch. de Genève, XXXV, 189. 1869.

(3) Arch. de Genève, XLIII, p. 263. 1872.

intensité sans pareille. Je n'ai jamais vu de spectacle plus saisissant, et ne puis exprimer la splendeur qu'il empruntait à son développement gigantesque, à la magnificence de sa coloration, ainsi qu'au calme absolu de l'atmosphère et de la surface liquide sur laquelle il reposait. »

M. Wartmann cite une troisième observation d'iris vue sur le lac, près de Genève aussi, le 5 juillet 1871, par M. W. Valier. Le phénomène lumineux s'étalait comme une bande orientée du N. au S., occupant une longueur de 200m sur une ligne allant de la pointe de Bellerive au port de Genève.

Voici une observation très intéressante que je dois à l'obligeance de E. Javelle, alors professeur au collège de Vevey.

« C'était le jeudi 28 décembre 1876, nous approchions de Rolle en bateau à vapeur ; il était une heure après midi ; le temps était beau, le ciel à peu près pur, le lac ridé. Comme je regardais la rive vaudoise, mon attention fut attirée par un arc-en-ciel d'une vivacité admirable ; il semblait étalé en ligne droite devant nous, à la surface de l'eau, dans la direction du nord, ce qui par l'effet du raccourci, lui donnait la forme d'un rectangle aux contours indéfinis... Il augmentait d'intensité à mesure que nous avancions ; il semblait si bien être étalé sur l'eau même et la revêtir de ses couleurs, qu'à l'instant où le bateau l'atteignit, je le voyais à 15 ou 20 pieds devant moi. On aurait dit que la proue entrait dans un fluide rouge et orangé. A ce moment, nous passions à travers une fontaine très étendue et parfaitement caractérisée. »

M. Wartmann attribue la production de l'iris à l'existence à la surface de l'eau d'une quantité considérable de matières pulvérulentes flottant sur la nappe liquide, et y formant une sorte de réseau assez uniforme. Autour de chaque corpuscule flottant, la surface de l'eau éprouverait une déformation capillaire ; l'anneau circulaire ainsi engendré constituerait une sorte de prisme à arête horizontale, et les rayons solaires s'y disperseraient.

Je ne suis pas en mesure de confirmer ou de réfuter par des observations personnelles cette théorie du physicien de Genève. Malgré une recherche attentive toutes les fois que j'ai vu le lac couvert de poussières, je n'ai jamais pu observer l'iris avec l'amplitude décrite par Wartmann.

Je suis pour ma part plutôt disposé à l'attribuer aux phénomènes de

dispersion chromatique produite sur des lamelles minces. Je me fonde :

a) Sur les nombreuses observations que j'ai faites de phénomènes analogues, mais sur une plus petite échelle, dans le port de Morges entr'autres, alors que des opérations de goudronnage de la coque des bateaux avaient versé des substances huileuses à la surface de l'eau.

b) Sur la production artificielle de l'iris que j'ai répétée bien souvent en étendant sur le lac quelques gouttes d'essence de térébentine ou d'huile d'olive.

c) Sur l'observation très précise de M. Javelle que j'ai reproduite plus haut. Il a constaté que l'iris se manifestait sur ce que l'on appelle une fontaine dans la langue des riverains du lac Léman ; et nous avons vu que les fontaines n'étaient pas autre chose que des taches d'huile. (1)

Jusqu'à plus ample informé, je rapporterai donc le phénomène de l'iris à ce que l'on appelle, en physique, les anneaux colorés dans les lames minces, et je chercherai la production de la lame mince dans l'étalement à la surface de l'eau d'une couche huileuse suffisamment épaisse, et de pouvoir réfringeant différent de celui de l'eau.

III. **Les rayons brillants de l'image du soleil.**

J'ai observé au bord du Léman, en mai 1894, un très joli phénomène que je veux décrire rapidement.

Sur un lac immobile, éclairé par un soleil brillant, je vois autour de l'image du soleil qui se réfléchit sur le miroir de l'eau, apparaître à intervalles irréguliers, et dans des positions quelconques, des traits de feu, rectilignes ou à peu près rectilignes, de $^1/_2$ à 1^{cm} de longueur, qui convergent vers le centre de l'image de l'astre. Ils ne sont pas liés à cette image ; chacun d'eux est une apparition spéciale, indépendante du foyer principal qui éblouit mon œil. Ces traits sont très ténus et sans durée appréciable ; rien n'annonce leur venue. Ils se voient jusqu'à une assez grande distance de l'image du soleil, jusqu'à 10 ou 20^m peut-être.

(1) Voir page 245.

Pour les observer plus facilement, je les regarde à travers un verre fortement coloré qui protège ma vue contre l'éclat trop violent de la lumière solaire réfléchie.

Par des observations et expériences trop longues à relater ici, je me suis assuré que ces traits de feu sont dus à des bulles minuscules de gaz qui s'élèvent dans l'eau et viennent éclater à la surface. Chaque bulle, dans l'espace qui entoure l'image du soleil, donne un de ces traits de feu. C'est au moment de l'éclat de la bulle que le phénomène lumineux apparaît.

J'ai retrouvé des apparitions analogues, mais sous forme de traits de feu beaucoup plus grands, plus larges, très minces au milieu de leur longueur, terminés en massue aux deux extrémités, quand j'ai cherché l'image du soleil sous la pluie d'un jet-d'eau dans un étang. Plus la goutte d'eau qui tombe dans l'eau est forte, plus le trait de feu est grand. Les étincelles de ces traits de feu dans ce cas apparaissent dans un champ plus étendu que dans le cas précédent, jusqu'à 20 ou 30° du centre de l'image du soleil.

Dans l'un et l'autre cas, le trait de feu est évidemment sur le plan même de la surface de l'eau ; il ne se développe ni dans l'air sus-jacent, ni dans les couches d'eau sous-jacentes.

Mon collègue et ami M. le prof. H. Dufour, à Lausanne, auquel j'ai décrit le phénomène, m'en a proposé l'explication suivante qui paraît exacte. Au moment où la bulle de gaz arrive à la surface de l'eau, elle soulève celle-ci en un cône surbaissé, qui peut réfléchir les rayons solaires jusqu'à une distance assez grande du point central où se fait la réflexion normale sur le plan horizontal de l'eau. Sur la petite éminence ainsi soulevée, la réflexion a lieu suivant une des génératrices du cône surbaissé, à savoir sur celle qui appartient au plan de révolution dont l'axe est donné par le soleil d'une part, et son point principal de réflexion sur le lac, pour la position de notre œil, d'autre part. Dans ces conditions, l'image du soleil qui se produit sur le cône est une droite dirigée comme un rayon vers le centre qui est l'image principale du soleil.

Dans le cas des traits de feu causés par la chute sur l'eau d'une goutte d'eau, la réflexion est analogue au cas des bulles de gaz, avec cette différence qu'elle ne se produit pas sur un cône soulevé, mais sur un cône enfoncé. Sauf ce point, l'explication en est la même.

IV. Déformation de l'image réfléchie sur la surface sphéroïdale du lac. Images de Charles Dufour.

Lorsque la réflexion a lieu sur la surface du lac suivant un angle excessivement faible, l'image d'un objet de la côte opposée se réfléchit sur une longueur telle que la rotondité de la terre intervient d'une manière sensible, et que le miroir du lac, au lieu d'être plane, devient un miroir convexe. Sur un miroir convexe, l'image réfléchie reste renversée, mais en même temps elle est déprimée.

M. le professeur Ch. Dufour, qui le premier a étudié ce phénomène, a soumis au calcul le cas suivant [1] : supposons que nous sommes à Morges, l'œil à 20^m au-dessus du lac. Nous regardons le clocher de Montreux à 35^{km} de distance ; le clocher est haut de 60^m, sa base est à 40^m au-dessus du lac, son sommet à 100^m. L'image du pied du clocher se fait sur le lac à 14210^m de Morges, l'image du sommet à 8490^m. Cette image occupe sur le lac une longueur de 5720^m. Or le clocher vu de Morges paraîtrait sous un angle de $5',54''$ et son image sous un angle de $1',43''$, c'est-à-dire qu'elle serait à peu près $3\,^1/_2$ fois plus faible. Ce serait assez pour la rendre presque méconnaissable. L'image serait ainsi déformée et réduite dans sa hauteur verticale entre le tiers et le quart.

Lorsque M. Charles Dufour fit à la Société Vaudoise des Sciences naturelles sa première communication sur cette question, ni lui ni moi ne pûmes appuyer le calcul sur des observations directes, et l'un et l'autre nous mîmes en doute la possibilité de constater le phénomène dans la nature. Pour que l'apparition soit possible, il faut en effet que les conditions thermiques de l'air et de l'eau soient telles qu'il n'y ait ni réfractions anormales ni mirages, ce qui est rare ; il faut en même temps que la surface de l'eau soit calme sur une étendue considérable ; il faut enfin qu'un observateur, suffisamment attentif et assez bien orienté sur les images produites à la surface du lac, se trouve là pour surprendre le phénomène.

L'observation cependant en a été faite quelques jours après, le 2

[1] Bull. S. V. S. N., XIII, 303.

avril 1873 ; pendant que de Morges j'examinais à la lunette une barque qui naviguait entre Ouchy et Evian, je vis très nettement au-dessous de la barque l'image renversée du bâtiment, très fortement déprimée ; les voiles donnaient par réflexion un triangle ayant à peine le tiers en hauteur de l'image réelle. C'était quelque chose de semblable à la fig. 123. Le lac resta assez longtemps calme pour que je pusse aller avertir M. Dufour et lui faire admirer la démonstration directe de ce que la théorie lui avait fait prévoir.

(Fig. 123.) Réflexion des voiles d'une barque sur la nappe sphéroïdale du lac.

Sur un autre bateau, qui prenait un chargement de sable à la pointe de la Venoge, plus rapproché de Morges par conséquent, nous voyions quelques hommes qui se mouvaient sur le pont de la barque ; leurs images de réflexion étaient étranges ; M. Dufour disait avec raison qu'on aurait dit un bateau manœuvré par un équipage de chiens.

Depuis lors cette déformation de l'image de réflexion a été vue par moi-même une trentaine de fois [1] ; j'ai pu la faire constater par mon ami le Dr Morax, de Morges. M. Raoul Pictet l'a reconnue d'après notre description. Enfin M. A. Riccò, de Palerme, l'a découverte à nouveau en 1888, en étudiant l'image du soleil qui se couche à l'horizon dans la mer Méditerranée ; il a même pu prendre des photographies de ces images. [2]

(Fig. 124.) Images de Ch. Dufour. Barque marchande, à Ouchy, vue de Chigny, sur Morges, 2 juillet 1887.

(Fig. 125.) Casino d'Amphion, vu de Chigny. 24 juillet 1887.

Le 20 novembre 1888, M. Riccò a répété la même observation sur des barques naviguant dans le golfe de Palerme ; dans une communication qu'il m'a adressée le lendemain, il adopte la comparaison de

(1) *F.-A. Forel.* Images réfléchies par la nappe sphéroïdale du Léman. C. R. Acad. Sc. Paris CVIII, 650. 1888.

(2) C. R. Acad. Sc. Paris CVIII, 590. 8 octobre 1888.

M. Dufour, et me dit que l'image réfléchie des hommes de ces barques semblait celles de chiens ou de gnômes.

Nous sommes donc cinq observateurs différents qui avons constaté la réalité de cette déformation, et avec M. Dufour, nous pouvons en tirer une nouvelle preuve de la rotondité de la terre. Cette démonstration n'est du reste pas banale, et n'est pas à la portée de chacun.

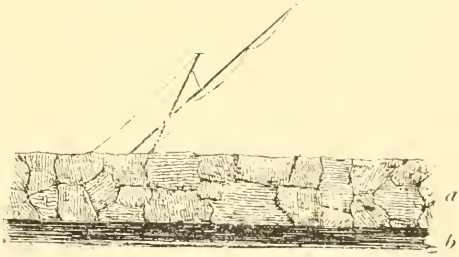
Je donne aux figures 124, 125 et 126 le croquis de quelques-unes des images ainsi déformées que j'ai observées moi-même sur le lac Léman.

(Fig. 126.) Yacht de plaisance, vu de Chigny, 15 août 1887.

Il sera commode de préciser par un nom l'apparition intéressante que nous venons de décrire. Je désignerai sous le terme d'*Image de réflexion de Charles Dufour* le phénomène dont la découverte théorique par mon vénéré maître et ami a devancé l'observation directe dans la nature.

V. **Déformation de l'image réfléchie des corps mal éclairés.**

Il est une déformation de l'image réfléchie qui est due à un mécanisme tout autre que les précédents. Un corps sombre, noir, se réfléchit à courte distance sur un lac blanc, sur une nappe d'eau brillamment éclairée, découpée en miroirs fragmentaires par les ondulations de vagues mortes. L'image de ce corps noir est remarquablement déformée; elle est déprimée; elle est diminuée de la moitié, des trois quarts de sa hauteur. Ainsi le mur du port de Morges, vu du quai dans ces circonstances, donne l'image de la figure 127 ; *a* représente le mur de la jetée, *b* l'image de ce mur noir réduite au quart de sa grandeur réelle. J'ai vu l'image de réflexion des peupliers de la côte de



(Fig. 127.) Réflexion du mur noir de la jetée du port de Morges, 21 juillet 1887.

Préverenges, contemplés de Morges à 2^{km} de distance, réduite au huitième ou au dixième de la hauteur de l'image réelle.

Cette réduction de l'image n'est point due à la rotondité de la nappe réfléchissante, comme dans le cas des images de Charles Dufour; c'est à trop courte distance et sur une longueur trop petite que se fait la réflexion. Je l'attribue à l'irradiation des parties éclairées qui éteint les parties sombres. Sur chaque vague, ainsi que nous l'avons dit, page 494, le mur noir se réfléchit aussi bien que le ciel blanc ou bleu clair; si ces diverses masses colorées avaient le même éclat, leurs relations réciproques resteraient les mêmes dans l'image composée de réflexion que dans l'image réelle. Mais les parties blanches et fortement éclairées s'irradient beaucoup plus que les parties sombres; elles débordent sur celles-ci; elles les éteignent, elles les effacent. Et en somme l'image réfléchie du corps noir est beaucoup plus petite, beaucoup moins nette que celle d'un corps blanc; un corps trop petit, un mât, une corde ne fait pas image sur l'eau dans de telles circonstances.

(Fig. 128.) Barque marchande réfléchie sur un lac clair, 31 mai 1889.

Dans la figure 127, le mât et les agrès d'un canot ancré de l'autre côté de la jetée ne donnaient aucune image sur l'eau du port.

La figure 128 reproduit le dessin d'une barque qui se dessinait comme un corps sombre sur la côte opposée et sur un lac brillamment éclairés, le 31 mai 1889, à 15^h.

VI. Arc-en-ciel réfléchi sur le lac.

Parmi les phénomènes que l'on peut relier à la réflexion des rayons lumineux sur le lac, un des plus intéressants et des plus brillants est la formation d'un second arc-en-ciel, excentrique au premier.

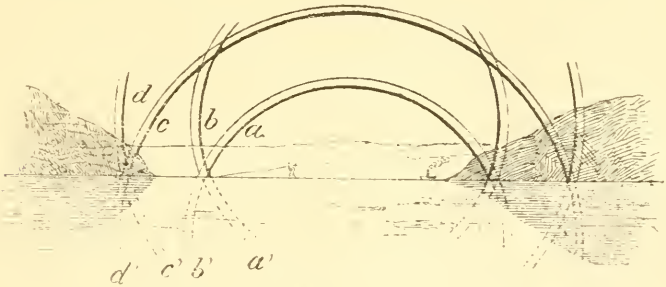
Le phénomène a été vu plusieurs fois sur le Léman [1]. J'analyserai

[1] V. Bull. S. V. S. N. V. 195; VII, 421; XXI, 191; XXV, 46.

la description la plus complète, celle de M. Henri Dufour [1] qui donne en même temps l'explication très satisfaisante de l'apparition.

Le 10 juin 1889, à 18^h10^m, M. G. de Palézieux, de Vevey, en station à Rivaz (entre Cully et Vevey) vit se former l'arc-en-ciel sur un nuage de pluie, dans la direction du Valais. L'arc primaire de 41° aussi bien que l'arc secondaire de 52° étaient complets. Le centre de ces arcs, soit le point antisolaire, était à 15° environ sous l'horizon. A côté de ces arcs normaux, il s'élevait en l'air des fragments d'arcs extraordinaires, venant couper les arcs normaux à peu près au niveau du lac, mais s'en écartant en dehors et se perdant dans les nuages. Ces arcs anormaux avaient la même disposition de couleurs que les arcs normaux, le rouge étant extérieur à l'arc primaire, intérieur à l'arc secondaire ; ils étaient de même rayon que les arcs normaux respectifs, mais leur centre situé dans le même plan vertical était de 30° environ plus élevé que le point antisolaire.

Ces arcs anormaux étaient dus à la réfraction sur les gouttes de pluie et au renvoi à l'œil des rayons solaires provenant de la réflexion de l'astre sur la nappe du lac. Derrière le spectateur s'étendait en effet le golfe de Cully, sur lequel le soleil, bas sur l'horizon (il devait être à 15° environ) était réfléchi en une masse énorme de lumière. Cette image du soleil sur l'eau équivalait à un second soleil, capable de former arc-en-ciel sur le nuage de pluie ; de là la formation des arcs anormaux.



(Fig. 129.) Observation de M. G. de Palézieux, 10 juin 1889.

Le spectacle vu par M. de Palézieux était plus complet encore. Il paraît que le lac était calme pendant son observation. Toujours est-il

[1] Note sur une forme rare d'arc-en-ciel. Bull. S. V. S. N. XXV, 46. Lausanne, 1890. Voyez aussi l'intéressant mémoire du même auteur sur la réflexion de l'arc-en-ciel à la surface d'une eau tranquille, *ibid.* XXI, 191, 1886.

qu'il décrit les arcs colorés, aussi bien les arcs-en-ciel normaux que les arcs anormaux, se réfléchissant eux-mêmes sur la nappe du lac. C'était donc 8 arcs lumineux qu'il avait à la fois devant les yeux, 4 arcs-en-ciel : a, b, c et d, et 4 images a', b', c' d', fig. 129.

Le phénomène ne se voit que dans des conditions spéciales : lac calme derrière le spectateur pour la formation des arcs anormaux, lac calme devant lui pour la formation des arcs réfléchis. Nous en avons cependant déjà 4 observations, plus ou moins complètes, que l'on trouvera aux sources citées plus haut.

IV. RÉFRACTIONS NORMALES ET ANORMALES DANS L'AIR ATMOSPHÉRIQUE EN CONTACT AVEC LE LAC

La trajectoire des rayons lumineux n'est une droite que lorsque le milieu qu'ils traversent est homogène ; sitôt que sa densité varie, ils sont réfractés, déviés de leur marche rectiligne ; dans ce cas les objets, aperçus par l'œil ne sont pas vus à leur place réelle, mais ils apparaissent à une distance plus ou moins grande (ces déviations sont toujours très petites) de leur position effective.

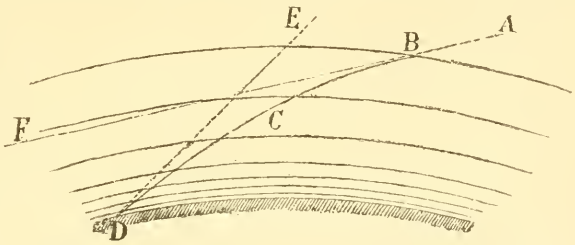
Les couches de l'air atmosphérique sont, par suite de la compression progressive des masses superposées, de densité croissante de haut en bas. Il en résulte des faits de réfraction, ce que l'on appelle la réfraction normale, qui modifient la place apparente de tout objet vu dans une direction autre que celle du zénith.

Outre cette réfraction normale, les perturbations apportées entr'autres par les actions thermiques et hygrométriques déterminent des accidents locaux de réfraction, les réfractions anormales. C'est ce qui a lieu très fréquemment dans l'air au contact avec le lac. La température de l'air et celle de l'eau sont le plus souvent différentes : tantôt l'air est réchauffé, tantôt il est refroidi par ses relations avec la surface du lac. Le plus souvent l'air se charge d'humidité par l'évaporation de l'eau. Les couches de l'air reposant immédiatement sur le lac sont par cela plus ou moins chaudes, plus ou moins humides que les couches sus-jacentes de l'air normal. Les rayons lumineux sont donc déviés anormalement en traversant ces couches en contact avec l'eau du lac. Il en résulte les phénomènes intéressants que l'on désigne sous le nom de réfractions et de mirages, en réservant, dans la

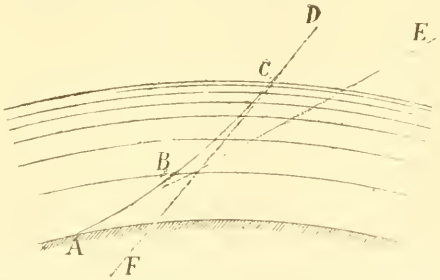
langue courante, ces termes aux réfractions extraordinaires, en dehors de la réfraction normale.

Ces phénomènes sont nombreux, compliqués, divers ; leur observation est difficile, leur description malaisée ; leur théorie complète nécessiterait des développements mathématiques dans lesquels je ne puis ni ne veux entrer. Je dois cependant essayer d'en donner une idée ; je chercherai à décrire les principales apparitions qui sont fréquentes sur la nappe du Léman et qui ont occupé depuis longtemps déjà les physiciens de Morges, de Lausanne et de Genève. Pour rester fidèle au plan de mon livre, je m'efforcerai d'expliquer, pour autant que je le saurai, les phénomènes, en m'en tenant aux notions de la physique élémentaire.

I. Le fait fondamental qui est à la base de tous les phénomènes de réfraction est la déviation que subit le rayon lumineux en traversant des couches de densité variable. En passant de couches plus denses dans des couches moins denses, ou inversement le rayon lumineux décrit une courbe dont la concavité regarde les couches les plus denses. Si la densité d'une atmosphère va en augmentant du haut au bas, fig. 130, un rayon lumineux qui la traverse suivra une trajectoire à concavité inférieure. Le rayon AB arrivera en D ; un rayon DE arrivera en B. Inversement, dans une atmosphère dont la densité croît de bas en haut, les rayons lumineux sont déviés suivant une courbe à concavité supérieure, fig. 131. Un rayon AE arrive en C, un rayon DC arrive en A.



(Fig. 130.) Réfraction dans une atmosphère de densité croissante de haut en bas.



(Fig. 131.) Réfractions dans une atmosphère de densité croissante de bas en haut.

Nous attribuons à un objet la direction qui est donnée par la tan-

gente à la courbe que décrit le rayon lumineux, lors de son entrée dans notre œil. Si l'œil est placé en *D*, fig. 130, il voit *B* dans la direction *DE* ; s'il est en *B*, il voit *D* dans la direction *BF*. De même dans la fig. 131, si l'œil est en *A*, il voit *C* dans la direction *AE* ; s'il est en *C*, il voit *A* dans la direction *CF*.

II. L'air atmosphérique est compressible ; sa densité, indépendamment de toute cause disturbante, chaleur ou humidité, augmente de haut en bas, le poids des couches superposées s'additionnant à mesure que ces couches sont plus épaisses. Si l'air avait une température et une humidité uniforme, les rayons lumineux qui le traversent décriraient des courbes à concavité inférieure.

Les couches de l'atmosphère étant des surfaces sphéroïdales, tout rayon lumineux, même horizontal, même tangent à la terre, traverse successivement des couches de densité différente ; il est nécessairement réfracté.

Du fait général de l'accroissement de haut en bas de la densité de l'atmosphère, tout rayon lumineux, dans une direction rapprochée de la tangente, décrit une trajectoire à concavité inférieure dont la courbure est à peu près égale au douzième de celle d'un des grands cercles de la sphère (Bravais). C'est la réfraction normale.

III. L'indice de réfraction [1] de l'air est 1.00029, celui de la vapeur d'eau 1.00026 ; par conséquent de l'air chargé d'humidité est moins réfringent que de l'air sec. Les couches atmosphériques en contact avec le lac étant plus humides, leur pouvoir de réfraction est amoindri, et la courbure des rayons lumineux qui les traversent est diminuée. Cette action des différences d'humidité est très faible ; elle peut le plus souvent être négligée.

IV. La température modifie la densité de l'air. Plus l'air est chaud, plus il est dilaté, moins il est dense.

Par le fait du contact avec une surface opaque comme la terre, fortement réchauffée par le rayonnement solaire, les couches inférieures de l'air sont en général plus chaudes que les couches plus élevées ; il y a le plus souvent stratification thermique inverse [2] dans laquelle

[1] A la température de 0° et sous 0.76m de pression.

[2] Nous gardons ici la terminologie qui nous a été si commode pour la stratification de l'eau. Une stratification d'ordre direct, (stratification directe) est celle dans laquelle les couches les plus chaudes sont superposées aux couches les plus froides ; une stratification inverse est celle dans laquelle les couches

les couches les plus froides sont superposées aux couches les plus chaudes. Il en résulte que la densité des couches inférieures est en général moins forte qu'elle le serait si la température de l'air était uniforme. Il en résulte que la réfraction normale est moins importante que si la pression agissait seule pour déterminer les variations de densité de l'air. La courbure des rayons lumineux est moins prononcée.

Cet effet de la température peut être si puissant qu'il arrive à dépasser l'effet de la pression atmosphérique. Si la stratification thermique est très serrée, comme cela a lieu pour un rayon rasant un corps très chaud, la courbure peut avoir lieu en sens inverse, et le rayon décrit une courbe à concavité supérieure.

Au contraire, si la stratification thermique est directe, c'est-à-dire si les couches inférieures sont plus froides que les couches supérieures, les deux effets, augmentation de la densité par la pression, augmentation de la densité par la température, s'additionnent, et la déviation du rayon lumineux, suivant une courbe à concavité inférieure, devient très forte ; elle peut presque atteindre la courbure du grand cercle de la terre. Je n'ai jamais vu qu'elle la dépasse.

Or ces deux faits peuvent se produire à la surface d'une nappe d'eau telle qu'un lac. Ou bien l'eau est plus chaude que l'atmosphère sus-jacente ; par son contact avec l'eau, l'air se réchauffe en couches d'autant plus chaudes qu'elles sont plus près de la surface liquide ; la stratification de l'air est inverse, et alors les rayons lumineux rasant le lac décrivent une courbe à concavité supérieure (voir fig. 130, p. 515). Ou bien l'eau est plus froide que l'air, l'air en contact avec le lac est stratifié en couches dont la température décroît de haut en bas; la stratification est directe et la concavité de la trajectoire lumineuse regarde en bas avec une courbure exagérée (voir fig. 131, p. 515).

De là deux classes générales de phénomènes de réfractions. Nous les désignerons d'après leur cause génératrice et nous les appellerons :

plus chaudes sont au-dessous de couches plus froides. Il y a bien dans l'application à l'atmosphère de cette terminologie rationnelle l'inconvénient d'une confusion possible avec ce que l'on appelle l'inversion de la température dans laquelle les couches supérieures de l'air sont plus chaudes que les inférieures ; il y a, dans ce cas, inversion de l'état habituel de la stratification thermique de l'atmosphère : mais en réalité, cette inversion est un retour à l'état normal ; les gaz les plus chauds sont, indépendamment de leur compression, plus légers que les gaz plus froids. Il suffit, je l'espère, d'être averti de cette distinction, pour qu'aucune confusion ne soit à redouter.

Réfractions sur eau chaude : par ce terme je condense la phrase plus explicite de : réfractions dans une atmosphère superposée à une eau plus chaude que l'air.

Réfractions sur eau froide, pour réfractions sur une eau plus froide que l'air.

Dans ces deux groupes, nous pouvons avoir à distinguer deux ordres de faits :

a) Les phénomènes de réfraction consistant simplement en un déplacement des objets considérés.

b) Les phénomènes de mirage, apparitions d'images secondaires des objets considérés, ou d'images sans réalité.

I. Réfractions sur eau chaude.

La température de l'eau est plus élevée que celle de l'air ; la couche d'air en contact avec l'eau est plus chaude, et par conséquent relativement moins dense que les couches supérieures. Les rayons lumineux tangents, ou à peu près, au lac, subissent des incurvations à concavité supérieure [1]. Il y a réfraction, par conséquent déviation du rayon lumineux, par conséquent déformation apparente des objets visés.

Pour l'étude de ces réfractions, il y a lieu de séparer deux groupes de phénomènes.

a) Les uns se rapportant à l'apparence de la surface d'eau visible jusqu'à l'horizon réel.

b) Les autres se rapportant à l'apparence des objets situés au-delà du point de tangence avec la surface du sphéroïde terrestre.

[1] Y a-t-il toujours incurvation à concavité supérieure ? La courbe de la réfraction normale est-elle toujours renversée au point de changer le sens de la courbure ? Cela n'est point nécessaire. Il suffit que le rayon anormalement réfracté décrive une courbe dont la concavité inférieure soit moins forte que la courbure de la réfraction normale pour qu'il y ait déviation relative dans la direction du rayon à son entrée dans l'œil, et par conséquent déplacement apparent de l'objet qui est vu dans la direction de la tangente à la courbe.

Pour plus de commodité dans l'exposition des faits, je rapporterai toutes mes descriptions à des trajectoires à concavité supérieure.

A. *Apparence de la surface d'eau.*

La surface d'eau paraît convexe, très convexe ; il y a exagération évidente de la courbure de la surface du sphéroïde terrestre.

En même temps, toute la surface visible de la nappe d'eau subit dans son ensemble une dépression apparente. Elle est abaissée au-dessous du plan horizontal. L'angle qu'elle fait avec le zénith est plus grand qu'il ne devrait l'être sans l'effet des réfractions aériennes.

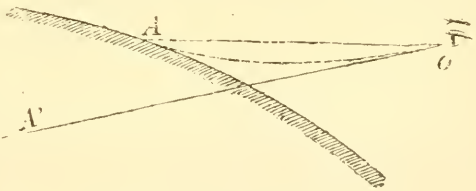
En troisième lieu, la limite de l'horizon est raccourcie, c'est-à-dire que le point de tangence du rayon visuel avec la surface de l'eau est plus rapproché de l'observateur qu'il ne le serait en l'absence de la réfraction, étant donnée la hauteur de l'œil au-dessus de la nappe d'eau.

Enfin la ligne de l'horizon apparent sur le lac, au lieu d'être droite et unie, présente des inégalités très accentuées. Des vagues très aiguës et très élevées paraissent se dresser en l'air ; quelquefois les sommets de ces vagues se séparent de leur base et, pour un temps très court, semblent flotter en l'air.

Je reprends le développement de ces divers points.

1° L'horizon apparent [1] est abaissé. En effet, chaque rayon lumineux émis par la surface de l'eau subissant une incurvation à concavité supérieure, arrive à l'œil en faisant avec l'horizontale un angle plus fort que sans l'effet de la réfraction.

Le point A (fig. 132) envoie un rayon lumineux dont la tangente, à son arrivée dans l'œil O, est suivant la ligne $A'O$.

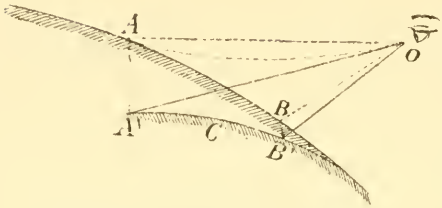


(Fig. 132.) Réfraction sur eau chaude.

Le point A est donc vu dans la direction A'. Cela est vrai pour chacun des points de la nappe liquide ; cela est vrai en particulier pour ceux qui forment l'horizon apparent. De là la dépression de cet horizon apparent.

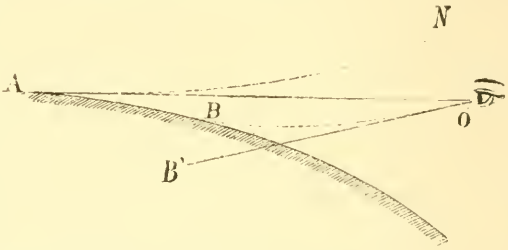
[1] J'appellerai horizon réel le point où la tangente partie de l'œil toucherait la nappe d'eau, en l'absence de toute réfraction (on calculerait sa position par la formule de la page 6 de ce volume) ; l'horizon apparent sera le point où le rayon visuel réfracté atteint cette nappe.

2° Les divers points de la nappe d'eau qui sont à des distances inégales de l'observateur émettent des rayons lumineux différemment réfractés. La réfraction est d'autant plus forte que les angles formés avec les surfaces réfractantes sont plus petits. Un point B (fig. 133) situé plus près subit un déplacement apparent en B' moins grand qu'un point A plus éloigné, qui apparaît en A'.



(Fig. 133.) Abaissement et exagération de la courbure apparente de la nappe du lac.

Il en résulte que la surface du lac $A\ B$ dont la courbure réelle est tellement faible qu'elle échappe à l'œil le plus exercé, offre à l'observateur pendant les réfractions sur eau chaude une incurvation apparente $A'\ C\ B'$ très manifeste, qui devient évidente et a été souvent signalée. La surface du lac paraît sphéroïdale; le spectateur croit surprendre la convexité de la terre.



(Fig. 134.) Rapprochement du cercle de l'horizon apparent.

3° La limite de l'horizon apparent est rapprochée. En effet les rayons émis par le point A tangent à la nappe d'eau pour la position de l'œil O (horizon réel) sont réfractés suivant la courbe AN et passent au-dessus de l'œil (fig. 134). Ce sont les rayons émis par un point B plus rapproché qui arrivent les premiers

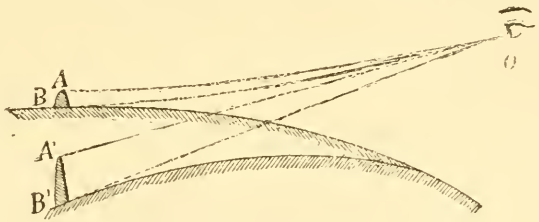
(Fig. 135.) Dentelures des vagues par un lac sombre sur un lointain clair.

(Fig. 135 *bis*.) Dentelures des vagues. Lac clair sur un lointain noir. Dessinée à la lunette.

dans le plan occupé par l'œil de l'observateur (horizon apparent).

4° Quant aux dentelures extraordinaires de la ligne de l'horizon (fig. 135 et 135 bis) elles n'apparaissent pas quand le lac est plat comme un miroir ; elles sont le plus belles quand le lac est agité par des vagues d'intensité moyenne ; elles disparaissent de nouveau lorsqu'un vent trop violent bouleverse les couches de l'air. Elles se voient surtout bien lorsque le lac est clair et se profile sur un lointain sombre. Je crois pouvoir les expliquer comme suit :

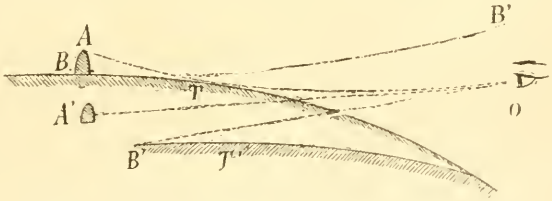
Soit une vague AB (fig. 136) située à l'horizon apparent qui envoie deux rayons, l'un par sa base B, l'autre par son sommet A, lesquels arrivent après réfraction à l'œil O. Le rayon B parti de la base traverse des couches plus chaudes que le rayon A parti du sommet ; la tangente du rayon B à son arrivée à l'œil OB' sera donc plus abaissée que la tangente OA' du rayon A du sommet de la vague. Il en résultera que l'image de cette vague, abaissée dans son ensemble en $A'B'$, comme nous l'avons vu plus haut, sera en même temps étendue en hauteur, $A'B'$ étant plus grand que AB, car le sommet A' est moins abaissé que la base B'.



(Fig. 136.) Exagération des dentelures des vagues.

Pour ce qui regarde les sommets des vagues paraissant se séparer de la ligne continue du lac, voici comment je m'en rends compte :

Soit T (fig. 137) le point tangent à la surface dont le rayon arrive en dernier lieu à l'œil O. Soit une vague AB située peu au-delà de ce point. Le rayon tangent BB' parti de la base de la vague sera dévié par réfraction en B' et passera au-dessus de l'œil de l'observateur. Il sera donc invisible. Un rayon AA', parti du sommet de la vague, sortant d'une couche moins chaude ou moins humide, sera moins réfracté, et peut arriver en O à l'œil. Il sera relativement peu abaissé, et donnera l'image d'un



(Fig. 137.) Sommet d'une vague se détachant de l'horizon.

objet isolé A, planant en l'air au-dessus de la surface T', surface apparente de l'horizon d'eau.

On pourrait admettre aussi que ces sommets de vagues qui apparaissent comme des corps isolés suspendus en l'air seraient des vagues situées à une plus grande distance et offrant l'effet de mirage que nous allons décrire. Je ne le pense pas; elles ont la même coloration, le même éclairage que les vagues qui limitent l'horizon apparent; elles ne sont pas situées à une grande distance au-delà de cet horizon.

Du reste, dans le cas spécial des vagues de refoulement des bateaux à vapeur qui nous offrent souvent ce spectacle d'être comme suspendues en l'air (fig. 138) [1], nous pouvons très facilement juger de leur

(Fig. 138.) Vagues latérales d'un bateau à vapeur se détachant sur un lac calme.

éloignement. En l'appréciant par l'apparence de la coque même du navire, ou par la position réelle de celui-ci que nous évaluons avec une grande précision, nous pouvons nous assurer que ces vagues sont à une distance de très peu supérieure à celle du cercle de l'horizon apparent.

B. *Apparence des objets situés au-delà de l'horizon. Mirage.*

Au-dessus de la surface d'eau ainsi déformée par les réfractions sur eau chaude, on voit les phénomènes suivants :

A une certaine hauteur, quelques minutes de degré au-dessus de l'eau, on voit une ligne horizontale plus ou moins tranchée que l'on appelle plan caustique avec Biot, ou mieux ligne de partage

[1] C'est à un phénomène de cet ordre qu'il faut rapporter les observations plus ou moins fantastiques du Grand serpent de mer qui apparaissent périodiquement dans les journaux.

avec Bravais (fig. 139 *NN*). Au-dessus de cette ligne se voient sans déformation notable les objets situés au-delà du cercle d'horizon apparent

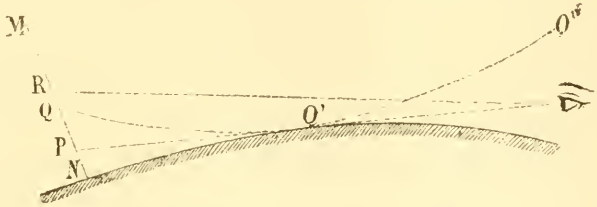
(Fig. 139.) Mirage des réfractions sur eau chaude.

(*R*, fig. 140) ; au-dessous de cette ligne, les mêmes objets se montrent réfléchis, renversés, déprimés, en image symétrique avec l'image vraie.

C'est ce dont j'ai essayé de donner une idée par la fig. 139 qui représente les images d'un bateau à vapeur dont on ne voit que la cheminée, le mât et les agrès, d'une barque du Léman et d'un cap de la rive opposée vus par le mirage.

Reprenons en détail ces divers faits :

Considérons un objet *MN* (fig. 140), une tour par exemple, situé au-delà de l'horizon réel pour l'œil *O* placé à une petite hauteur (quelques mètres) au-dessus de la nappe d'eau. Une partie de *MN*, soit *NP*, est cachée par la rotondité de la terre ; appelons-la : partie masquée.



(Fig. 140.) Parties masquées ou en vue, visibles ou invisibles, dans les réfractions sur eau chaude.

Une autre partie *MP* est en vue, s'il n'y a pas réfraction des rayons lumineux. Mais s'il y a les réfractions sur eau chaude, une certaine hauteur de cette partie en vue n'est pas visible par *O*. En effet, un point *Q* émet un rayon qui est réfracté suivant une trajectoire à concavité supérieure ligne *Q Q' Q''*, de telle manière qu'il passe au-dessus du plan où est logé l'œil *O*. L'œil ne voit que les objets situés au-dessus d'un plan *OR* qui traverse des couches d'air de densité assez uniforme pour ne plus causer de réfractions anormales [1]. L'œil ne voit

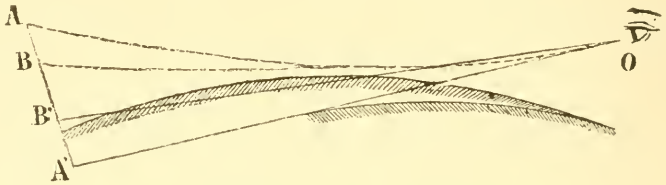
[1] Les objets situés au-dessus de la ligne de partage ne sont pas sensiblement déformés ; je n'ai jamais, en particulier, constaté l'allongement en hauteur qui ferait supposer que les rayons lumineux de l'image réelle sont déformés par réfraction.

dans la partie en vue que la hauteur RM, appelons-la partie en vue et visible tandis que la hauteur PR sera en vue mais invisible par le fait de la réfraction.

Le point R fait partie du plan de partage qui sépare l'image vraie de l'image de réfraction ou mirage.

Ne nous occupons maintenant que de la portion RM de notre objet, de la partie en vue et visible.

Si la couche d'air fortement stratifié au contact de l'eau n'est pas trop épaisse, si la stratification anormale, de type inverse, que le contact avec l'eau plus chaude détermine dans les couches inférieures de l'air ne s'étend pas trop haut, tout point A en vue et visible enverra à l'œil un rayon qui lui arrivera directement, sans autre dé-



(Fig. 141.) Image renversée du mirage sur eau chaude.

viation que la réfraction normale. De la réunion des rayons lumineux partis des différents points AB de l'objet considéré il résultera, pour notre œil une image vraie, de grandeur naturelle, droite, en position non renversée. Nous verrons l'objet alors même qu'il est à l'horizon avec sa grandeur et sa forme normales (fig. 141).

Mais en même temps il arrivera à l'œil un rayon réfracté anormalement. Un autre rayon lumineux parti du même point A pénétrant dans les couches de stratification thermique inverse, de densité décroissante de haut en bas par le fait du réchauffement au contact du lac chaud, sera réfracté anormalement, suivant une courbe à concavité supérieure ; il pénétrera dans l'œil du spectateur en remontant de bas en haut. Il donnera une seconde image du point visé, image que nous reporterons au point A' en suivant la tangente de la trajectoire à son entrée dans l'œil. La courbure de cette trajectoire ayant une concavité supérieure, la position de cette image de réfraction sera située au-dessous de l'image vraie (fig. 141).

Ce déplacement de l'image réfractée sera d'autant plus grand que les points visés seront plus élevés ; plus l'objet sera haut au-dessus de

l'eau, plus serrée devra être la courbure de la trajectoire réfractée qui arrivera à notre œil, plus aussi la tangente à cette courbe fera un angle plus fort avec le rayon direct. Par conséquent les divers points AB de l'objet visé paraîtront dans leur mirage $A'B'$ d'autant plus bas au-dessous de l'image vraie qu'ils seront eux-mêmes plus haut au-dessus de l'eau. A' image de A apparaîtra au-dessous de B' image de B parce que A est situé lui-même plus haut que B. Par conséquent l'image réfractée sera symétrique, renversée au-dessous de l'image vraie. Elle apparaîtra comme une image réfléchie. Elle forme le mirage.

Le mirage est donc l'apparition au-dessous de l'image vraie d'une image symétrique, renversée au-dessous de celle-ci. On dirait d'une image formée sur un miroir, ou sur une nappe d'eau calme.

C'est en ces termes que j'essaie de donner, indépendamment de toute formule et de toute expression mathématique, je ne dirai pas l'explication, mais la description populaire des réfractions sur eau chaude et du mirage.

Quant à sa théorie scientifique, je renvoie aux nombreux mémoires qui ont abordé et épuisé la question, comme ceux de Monge (1), Biot (2), Bravais (3), J. Macé de Lepinay et A. Perot (4), etc.

Tant de maîtres ont traité ces problèmes qu'il nous reste peu de chose à glaner pour des observations originales sur notre lac. Voici cependant le petit contingent que nous pouvons apporter à ces études :

1. Le mirage accompagne toujours les réfractions sur eau chaude. Il semble en être un symptôme nécessaire. Je ne l'ai jamais vu manquer lorsque les conditions de sa production, superposition d'un air plus froid sur un lac plus chaud, sont représentées, c'est-à-dire pour le Léman pendant les trois quarts de l'année. Le mirage est d'apparition très fréquente.

Les réfractions sur eau chaude et le mirage qui en est le phénomène symptomatique le plus apparent, ont lieu sur le lac avec plus

(1) Sur le phénomène d'optique connu sous le nom de Mirage. Description de l'Egypte. 1799. t. I.

(2) Sur les réfractions extraordinaires qui s'observent près de l'horizon. Mémoires de l'Institut de France. X. 1810.

(3) Annuaire météorologique de la France, IV, 227, Paris 1853.

(4) Annales de Chimie et de Physique. XXVIII, 1892.

d'évidence que sur une surface terrestre quelconque. La parfaite régularité de la nappe aqueuse en rend l'observation plus facile que sur une plaine avec ses accidents inévitables.

Je n'ai pas vu de plus beaux mirages, ni dans la plaine de la Crau, entre Arles et Marseille, ni dans le Sahara de Biskrah, que ceux que nous pouvons admirer chaque jour d'hiver sur le Léman.

Les réfractions sur eau chaude ayant lieu chaque fois que l'air est plus froid que le lac, il en résulte que le mirage est presque constant dans l'arrière-automne et dans l'hiver pendant toute la journée, au printemps et en été pendant la matinée seulement. Cela résulte de ce que nous avons dit des rapports de température de l'air et de l'eau du lac. C'est le type de réfraction de beaucoup le plus fréquent sur le Léman

2° Les mirages sont apparents sur le lac quel que soit l'état d'agitation de l'air ; j'en ai constaté par les bises les plus violentes, par les lacs les plus tourmentés (1). L'immobilité de l'image réfléchie du mirage fait alors un contraste frappant avec la turbulence des flots qui s'entrechoquent près de nous. On dirait la juxtaposition d'un lac d'huile à l'horizon, au-dessus et au-delà de la région où sévit la tempête.

3° On ne peut qu'être étonné de la rapidité avec laquelle la stratification thermique nécessaire pour la production du mirage s'établit sur le lac. Quand, en hiver, il souffle un vent de bise, si je vais m'établir au fond du golfe de Morges dans le jardin de la Blancherie, si je regarde dans la direction de la Venoge, mon rayon visuel traverse de l'air qui arrive directement de la terre ; il n'a pas cheminé plus d'une centaine de mètres sur le territoire du lac. C'est de l'air de terre ferme, par conséquent de l'air qui, jusqu'à son arrivée au lac, a été en contact avec un sol plus froid que la température moyenne de l'air, sur de la neige glacée, par exemple ; cet air n'avait donc en rien la stratification thermique inverse qui produirait les réfractions du mirage. (2)

Et cependant les réfractions d'hiver et le mirage y sont déjà évidents et brillants.

(1) Pendant que je corrigeais les épreuves de ce chapitre, j'ai cependant constaté l'absence complète de tout mirage pendant la bise furieuse du 1er octobre 1894. A 9h dans la direction sous le vent, la pointe du Boiron vue de Morges ne montrait pas trace de mirage, même sur le miroir que j'abaissais à quelques centimètres de l'eau ; et cependant je voyais la ligne d'horizon entre l'objet visé et moi. Température de l'air 9,2°, température du lac 12,0°.

(2) J'ai vu des mirages dans ces conditions entr'autres le 2 décembre 1889, à 14h, la température de l'air étant — 1,3°, celle du lac + 6,4°, la bise étant très forte et le ciel serein.

Si nous donnons à la bise une vitesse de 5^m, de 10^m par seconde, et si nous constatons que le trajet de l'air sur le lac n'a été que d'une centaine de mètres au plus, nous arrivons à la notion très étonnante, presque incroyable, qu'il a suffi de 10 ou 20 secondes de temps pour que l'air ait pris sur le lac la stratification thermique nécessaire à l'établissement du mirage. Cela est conforme, mais en l'illustrant d'une manière instructive, avec ce que nous savons de la décroissance rapide d'un courant d'air qui se meut sur une surface solide, rugueuse ; cela indique probablement l'adhérence à l'eau d'une couche d'air déjà réchauffée par un contact prolongé, qui avance avec une vitesse beaucoup plus lente que les couches d'air superposées, emportées par la violence de la bise.

4° Les réfractions sur eau chaude et le mirage sont visibles sur le lac dès que le cercle d'horizon apparent est moins éloigné que la côte opposée. Ils ne deviennent bien évidents que lorsque le cercle de l'horizon n'est pas trop distant, et que par conséquent les objets situés au-delà de ce cercle sont encore suffisamment nets. Il en résulte que les phénomènes de mirage ne sont faciles à constater que lorsque l'œil de l'observateur est à une faible hauteur au-dessus de la nappe du lac, quelques mètres à peine.

On peut cependant voir le mirage d'une station même assez élevée. Ainsi le 16 octobre 1894 à 15^h, de la terrasse de Chigny, sur Morges, à 75^m au-dessus du lac, j'observais de superbes mirages dans la direction de Montreux, Chillon et Villeneuve, à la distance de 35^{km}. L'air était d'une transparence admirable et sa température très fraîche donnait de bonnes conditions des réfractions sur eau chaude.

5° Comme nous l'avons dit, en cas de réfraction sur eau chaude, le cercle de l'horizon apparent est notablement rapproché ; il s'en suit que les mirages se manifestent en hiver sur des objets qui en l'absence de réfraction eussent été bien en deçà de ce cercle.

C'est ainsi qu'en hiver (observation du 14 décembre 1889) j'ai pu constater des mirages sur la pointe du Boiron, distante de 1600^m de la grève du Parc de Morges, quand mon œil était à 2.2^m au-dessus de la nappe du lac. A cette hauteur visuelle, le cercle de l'horizon normal passerait à 5292^m de l'observateur [1] ; en réalité ce jour-là le cercle de

[1] Pour calculer cette distance, je me sers simplement de la formule donnée à la page 6 de ce volume ; je n'y fais pas intervenir la valeur de la réfraction normale. Celle-ci augmenterait encore la distance de l'horizon réel, et la différence signalée entre celle-ci et l'horizon apparent serait encore plus forte.

l'horizon apparent passait en deçà de 1600^{m} ; il y avait donc rapprochement de plus de 3.3 pour la distance de ce cercle d'horizon.

5° Il n'est pas besoin d'une surface d'eau bien étendue pour voir le mirage ; il suffit d'abaisser l'œil près de la nappe aqueuse et alors le mirage devient apparent, même à de courtes distances ; dès que la branche ascendante de la trajectoire réfractée peut se relever pour arriver à l'œil, il y a production du mirage.

Dans mes études de janvier 1889, j'ai cherché, à l'aide d'un miroir argenté que j'abaissais progressivement jusqu'à la surface de l'eau si je pouvais trouver une limite à ces mirages et je n'y suis pas arrivé. A 10^{cm}, à 5^{cm} au-dessus de l'eau, par un beau jour d'hiver, le mirage est dans toute son évidence ; je l'ai suivi avec certitude jusqu'à 2^{cm}, et même à 1^{cm} au-dessus de la nappe d'eau. Plus bas je n'ai pu obtenir une observation certaine, car même dans les calmes les plus parfaits, il y avait toujours assez de houle pour que la vague vînt mouiller le miroir à 1^{cm} au-dessus du niveau moyen de l'eau, et altérer la pureté de l'image.

Lorsque le rayon visuel est ainsi presque à fleur d'eau, la tangente va couper la surface du lac à un bien court éloignement ; des feuilles mortes que je jetais sur l'eau et qui flottaient à dix mètres de distance me semblaient être sur la ligne de l'horizon apparent. C'était il est vrai une illusion due au rapprochement du cercle d'horizon par la réfraction sur eau chaude ; car à 1^{cm} au-dessus de la nappe d'eau, en l'absence de réfractions, la tangente devrait passer à 357^{m} de distance de l'observateur.

6° La grandeur du mirage, c'est-à-dire l'angle formé par le plan caustique avec le plan de l'horizon apparent, a été étudiée sur le lac Léman par Louis Dufour [1]. Il l'a mesurée de sa station de Villeneuve et lui a trouvé des valeurs variant de 3 à 4, à 6 minutes de degré ; dans le cas le plus exagéré, il a constaté un angle de 11′42″. Cette grandeur n'est pas la même pour divers objets situés à des distances inégales.

Dans la règle, le mirage est plus grand pour des objets éloignés que pour des objets rapprochés ; la différence n'est du reste pas très forte. J'en donnerai un exemple tiré des observations de L. Dufour :

[1] *L. Dufour*. Des températures de l'air et des mirages à la surface du lac Léman. Bull. S. V. S. N., V, 26 sq. Lausanne 1858.

8 octobre 1854.	7^h45.	Villeneuve.
localité visée.	distance.	grandeur du mirage.
Clarens	5220^m	3′48″
Basset	5900	4′ 0″
Vevey	9330	5′30″

Exceptionnellement, la différence est en sens inverse, et les objets les plus éloignés semblent moins relevés au-dessus de la ligne d'horizon apparent. Exemple de L. Dufour :

8 octobre 1854.	8^h.	Villeneuve.
localité visée.	distance.	grandeur du mirage.
Vernex	4600^m	7′30″
Clarens	5220	7′50″
Basset	5900	6′ 0″
St-Saphorin	12920	4′48″

Du reste la grandeur du mirage varie avec la hauteur de l'œil au-dessus de la nappe d'eau. Dans plusieurs séries d'observations où il déplaçait la hauteur de l'œil de 1.8^m à 0.75^m, L. Dufour a toujours vu la grandeur du mirage augmenter à mesure qu'il se rapprochait de l'eau. J'en citerai un exemple : La pointe du Basset, à 5900^m de Villeneuve, le 5 octobre 1854 à 8^h30^{min}, paraissait soulevée au-dessus de l'horizon apparent :

pour l'œil à	1.75^m	de 1′54″
	1.10	2′18″
	0.75	2′42″

Enfin L. Dufour a encore constaté que la grandeur du mirage est très variable ; en suivant le même objet, de minute en minute, il voyait le soulèvement du plan caustique au-dessus de l'horizon apparent tantôt augmenter, tantôt diminuer, de plusieurs secondes de degré, de plusieurs minutes même :

5 octobre 1854. L'œil étant à Villeneuve à 75^{cm} au-dessus de l'eau, la pointe du Basset distante de 5900^m, apparaissait soulevée :

à	8^h45^{min}	de 4′12″
	46	3 36
	47	4 00
	48	3 13
	49	5 18

etc.

Je n'ai pas eu l'occasion de faire moi-même des mesures d'angle analogues à celles de Dufour. Mais toutes mes observations sont d'accord avec les faits généraux que je viens d'analyser.

J'ajouterai que d'après mon impression subjective, malheureusement non appuyée par des mensurations directes, la grandeur du mirage n'est pas toujours proportionnelle à la différence de température entre l'air et l'eau. J'ai vu des mirages énormes quand cette différence était peu forte, et des mirages très faibles quand l'air était très froid sur un lac très chaud.

7° J'ai un procédé fort simple d'apprécier sans instruments, je ne dirai pas la grandeur, mais l'intensité des mirages. Je cherche le rapport entre la hauteur h' de la tangente réfractée d'un point de distance connue qui est à l'horizon apparent, et la hauteur h de la tangente de ce même point s'il n'y avait pas de réfraction. [1]

Pour la hauteur h' je choisis un point saillant d'une côte peu éloignée et je cherche, en élevant progressivement l'œil au-dessus de l'eau, le moment où j'arrive à voir ce point à l'horizon ; c'est la limite entre les hauteurs inférieures où je vois encore le mirage sous le point visé, et les hauteurs supérieures où le point visé est dominé par la ligne de l'horizon.

Un calcul très simple (voyez p. 6) me donne la hauteur h à laquelle la même tangente aurait passé en l'absence de toute réfraction.

Voici quelques observations qui expriment ainsi l'intensité des mirages :

1889		Point visé.	Distance.	Température de l'air.	Température du lac.	h	h'	$\frac{h'}{h}$
14	décembre	Pointe du Boiron	1600^m	+ 1.5	+ 5.6	0.20^m	2.5^m	12.5
16	»	id.	id.	+ 2.0	+ 5.4	0.20	1.9	9.5
16	»	Pointe de la Venoge	2100	+ 2.0	+ 5.4	0.35	2.3	6.5
17	»	id.	id.	0.0	+ 5.2	0.35	3.0	8.6
17	»	Pointe du Boiron	1600	0.0	+ 5.2	0.20	2.4	12.0

Si mon procédé est bon, et il me le paraît, les chiffres qu'il donne montrent qu'il n'y a pas nécessairement proportion entre l'intensité du mirage et les différences de température du lac et de l'air.

8° L'image réfléchie du mirage est toujours d'une netteté parfaite,

[1] Archives de Genève, XXIII, 272. 1889.

ce qui la distingue très facilement des images de réflexion avec lesquelles une observation insuffisante pourrait la confondre.

L. Dufour [1] indique un moyen élégant de séparer les deux images qui dans certains cas de lac très calme pourraient se superposer : c'est l'emploi de la lumière polarisée. En regardant à travers un prisme biréfringent les images superposées, il rendait plus sombre la partie inférieure de l'image due à la réflexion (c'est de la lumière fortement polarisée) ; il laissait sans altération de ton la partie supérieure due à la réfraction du mirage (lumière non polarisée).

9° C'est à la stratification thermique d'ordre inverse que la production des réfractions sur eau chaude et du mirage doit être attribuée. Louis Dufour, dans ses études de 1854, a voulu vérifier le fait et constater les variations de la température de l'air au contact avec une eau plus chaude que l'air ; à bord d'une nacelle, avec les précautions convenables, il a mesuré la chaleur de l'air à différentes hauteurs au-dessus du lac. Il a reconnu une stratification thermique constante dans les heures de la matinée des mois de septembre et octobre 1854 ; l'air est réchauffé à son contact avec l'eau, et ce réchauffement décroît d'intensité jusqu'à une hauteur de 1 à 2^{m}, où la température devient uniforme. Je citerai une seule des très nombreuses observations qui ont établi cette loi :

5 octobre 1854. 7^{h}30^{min}. Température de l'eau 15.6°.

Hauteur au-dessus de l'eau	Température de l'air.
0.0^{m}	12.28°
0.1	11.96
0.2	11.65
0.4	11.38
0.6	11.24
0.8	11.20
1.5	11.11
1.8	11.11

En appliquant à cette progression la formule classique de Bravais qui exprime la variation de densité de l'air à son contact avec une surface réchauffée, L. Dufour a reconnu que cette formule s'applique parfaitement aux faits observés par lui.

[1] [Loc. cit. p. 528]

Je renvoie au mémoire original de L. Dufour pour le développement de ses importantes recherches.

10° De même que nos réfractions et mirages sur eau chaude se voient surtout en hiver quand l'air est plus froid que l'eau, de même ils peuvent apparaître sur un lac gelé quand la température de l'air est suffisamment basse. L'un des plus beaux mirages est celui que j'ai admiré le 25 janvier 1880, sur le lac de Zurich recouvert, dans ces jours de fête, par des dizaines de milliers de patineurs ; l'air était à — 10.5°, la surface supérieure de la glace à — 3.8° (voyez p. 384) ; il y avait dans cette différence de température les mêmes rapports qui nous donnent les réfractions sur eau chaude ; de là les mirages pour les objets situés au-delà de l'horizon apparent. (1)

11° J'ai dit que les réfractions sur eau chaude et le mirage ont lieu chaque fois que l'air est plus froid que la surface du lac. Ce n'est cependant pas la seule circonstance dans laquelle le phénomène apparaisse, et j'ai maintenant à décrire ce que je suis entraîné à appeller *le mirage sur eau froide.*

Je l'ai observé pour la première fois le 5 août 1887 sur le lac de Zoug. Occupé à faire, devant la ville, sur l'emplacement de la catastrophe récente, une série de sondages thermométriques pour étudier la possibilité de rechercher des sources sous-lacustres, je fus frappé par l'éclat d'un superbe mirage dans la direction de Cham. J'en conclus immédiatement que l'air sus-jacent devait être sensiblement plus froid que l'eau, et grand fut mon étonnement de constater que tel n'était pas le cas, que, dans l'endroit du moins où je me trouvais, l'air avait la même température que l'eau, était même plutôt un peu plus chaud. La température de l'air, à 1^{m} au-dessus de l'eau, était, dans notre bateau, en plein lac, à 22.5° ; la chaleur de la surface de l'eau variait, suivant les places, de 22.3° à 21.8°. Aucune brise n'agitait le lac ; j'en pouvais conclure que la température de l'air était régulièrement stratifiée, et que les faits observés par moi devant Zoug se reproduisaient, à peu près les mêmes, sur les quelque cinq kilomètres que traversait mon rayon visuel.

(1) Que l'on me pardonne le dessin plus que fantaisiste qui accompagne une note de la Nature de Paris dans laquelle je décrivais ce phénomène (La Nature, VIII, 1, p. 289, Paris 1880). Le graveur s'est permis des libertés qui ont absolument déformé mon croquis, et je n'ai pas été appelé à donner le bon à tirer. Ne possédant plus l'original, je ne puis le reproduire ici.

Ces mirages étaient donc dans des conditions anormales. Tout autre explication étant exclue par les circonstances de temps et de lieu, j'attribuai la production de ce mirage à une stratification de l'air en couches inégalement humides, de richesse en vapeur d'eau croissante de haut en bas.

Depuis cette époque, j'ai fréquemment observé en été, sur le Léman et ailleurs, des mirages très semblables à nos mirages d'hiver, mais se produisant dans les mêmes conditions qu'à Zoug, c'est-à-dire dans un air plus chaud que la surface du lac. Pendant l'année 1889, j'ai noté le phénomène jusqu'à 37 fois.

Je mesurais la température de l'eau du lac au bout du débarcadère de Morges. Cela me donnait, il est vrai, la température littorale, et non la température pélagique ; mais la seconde est normalement en été plutôt plus basse que la première, et sous ce rapport la correction de l'erreur que je pouvais commettre aurait probablement exagéré l'anomalie des conditions du mirage [1]. Je mesurais en même temps la température de l'air au thermomètre de la colonne météorologique du quai de Morges. J'avais là, il est vrai, une cause d'erreur assez grave : en effet, c'était de l'air de terre-ferme et non de l'air lacustre, de l'air peut-être plus chaud que l'air sus-jacent au lac. Mais cette erreur, probable dans certains cas, était nulle dans d'autres cas assez nombreux. Ainsi fort souvent, quand je constatais ces mirages sur eau froide, le vent soufflait en rebat, venant du large sur la terre ferme ; le thermomètre était donc baigné dans un air lacustre qui nous apportait la température du plein lac. Ainsi encore, dans quelques cas où ces mirages étaient bien prononcés, je suis sorti en péniche jusqu'à quelques kilomètres au large, ou bien j'ai fait une course en bateau à vapeur, voire même une traversée jusqu'en Savoie, et j'ai constaté qu'en plein lac il y avait de même des conditions anormales pour la production du mirage, à savoir superposition d'un air plus chaud sur un lac plus froid. Enfin la différence énorme de température que j'ai constatée parfois, jusqu'à 6 ou 7 degrés en mai et juin 1889, exclut toute idée d'erreur d'observation, suffisante pour expliquer le phénomène. Quelque erreur partielle que j'aie pu faire dans les lectures thermométriques, il est impossible qu'en les additionnant on puisse

[1] C'est ce que j'ai pu vérifier pour les observations des mois de juillet et août, où je disposais des températures pélagiques mesurées par les capitaines de bateau à vapeur. L'anomalie a le plus souvent été exagérée, jamais elle n'a été annulée.

satisfaire aux 6 à 7 degrés et plus qui rétabliraient les conditions nécessaires du mirage classique.

Je vais donner quelques exemples de mes observations de 1889 qui montreront les conditions du phénomène. Toutes les lectures ont été faites à midi :

Date.	Temperat. de l'air littoral.	Temperature du lac.		Difference	Etat du lac et du ciel
		littorale.	pelagique.		
24 mars	8.0°	6.4°	—	1.6°	Rebat, grand-beau
4 avril	10.0	6.6	—	3.4	id. gris
25 »	11.5	8.2	—	3.3	Vauderon, gris-bleu
13 mai	19.6	12.6	—	7.0	Calme, grand-beau
31 »	24.5	16.8	—	7.7	Rebat id.
21 juin	27.2	20.2	—	7.0	id. orageux.
9 juillet	28.2	22.2	21.1	6.0	id. grand-beau
11 »	28.5	23.9	22.1	4.6	id. id.
17 août	22.5	18.6	18.6	3.9	id. id.
24 »	19.0	16.2	17.4	2.8	Sudois faible. Averses
30 »	24.4	19.5	18.8	4.9	Calme, grand-beau
24 sept.	17.0	14.2	—	2.8	Rebat id.

Je conclus de ces faits et de ces chiffres que dans un air plus chaud que l'eau sous-jacente, il peut y avoir apparition d'un mirage semblable ou analogue au mirage d'hiver.

Je ne suis pas le seul qui ait fait ces constatations. J.-L. Soret, que j'avais consulté sur mes observations de Zoug, dans sa note du 5 juillet 1888, les décrit en ces termes [1] : « Au mois de juin 1888, à Evian, il a observé le mirage ordinaire lors même que, tout au moins pour certaines de ces journées, la température de l'air dût être supérieure à celle de l'eau... Il est possible que ce fait se rattache à l'état hygrométrique de l'air. » Dans l'été de 1889, MM. Ch. Dufour, à Morges, et A. Delebecque, à Thonon, avertis par moi de ces anomalies, ont répété ces observations et les ont entièrement confirmées.

Je suis donc autorisé à affirmer que quelque chose de très analogue au mirage classique des auteurs, au mirage du désert, à ce que j'appelle le mirage des réfractions sur eau chaude, peut apparaître sur le lac

[1] Archives de Genève, XX, 302, 1888.

lorsque l'air est superposé à une eau plus froide : que par conséquent ces mirages sur eau froide existent bien réellement.

— Etudions maintenant les conditions de ce mirage sur eau froide et les particularités qu'il présente.

A. Le mirage sur eau froide succède sans interruption au mirage sur eau chaude. Dans la matinée des jours d'été où je l'ai observé, les circonstances du mirage normal étaient parfaitement représentées ; l'air était plus froid que l'eau et nous avions sur le lac les réfractions normales sur eau chaude. Bientôt, sous l'action du soleil, l'air se réchauffait, arrivait à être aussi chaud que l'eau, puis plus chaud. Nous aurions attendu à ce moment suppression des réfractions d'abord, puis changement de type et apparition des réfractions sur eau froide. Mais, et c'est ce qu'il y a d'anormal, le mirage persistait, sans modifications sensibles, les réfractions ne transformaient pas leur type. Ce mirage sur eau froide n'est donc pas autre chose que la prolongation ou la persistance du mirage sur eau chaude après que la température de l'air s'est élevée.

B. Nous avons montré, par les observations citées, que le mirage sur eau chaude peut persister sur l'eau froide alors que la température de l'air est de 3°, de 5 et même de 7° plus élevée que celle de l'eau. Admettons que par des erreurs d'observation, de correction des thermomètres, et surtout par les conditions de la localité où se faisaient les lectures thermométriques, cette différence doive être réduite de 2 ou 3 degrés dans les régions du lac où s'opéraient les réfractions — toujours est-il qu'il est incontestable que la persistance du mirage peut se continuer non seulement dans un air de même température que l'eau sous-jacente, mais même dans un air plus chaud de plusieurs degrés que l'eau de surface du lac.

C. Si je prolonge l'observation dans l'après-midi, je vois le plus souvent le type des réfractions changer presque subitement : en un quart d'heure, en quelques minutes, le mirage a disparu et nous nous trouvons en présence des réfractions sur eau froide que nous décrirons bientôt. Ce changement est très rapide : j'ai plusieurs fois été témoin de cette transformation : elle a lieu d'abord sur une partie seulement du lac, puis elle gagne successivement toute l'étendue de l'horizon visible : c'est ce qu'on appellerait en style de théâtre un changement à vue.

D. Le mirage sur eau froide n'a jusqu'à présent été observé que par

un temps de calme ou de brises légères, rebat, morget ou vent sudois très faible. Je ne l'ai jamais noté par des temps de grande bise, de grand sudois, ou de grande vaudaire

E. La grandeur du mirage sur eau froide peut être assez forte. Sans que j'aie fait des mesures d'angles, je puis cependant dire que je lui ai vu toutes les grandeurs que l'on observe dans le mirage normal d'hiver.

Une seule fois, le 9 juillet 1894 à midi, j'ai essayé d'apprécier l'intensité de ce mirage sur eau froide (voyez p. 530) : température de l'air 26.5°, température du lac 21°, airs de rebat. Je visais la pointe de la Venoge, distante de 2300^{m} du quai de Morges où j'étais en observation. La tangente h partie de la Venoge aurait passé, s'il n'y avait pas eu de réfraction, à 43^{cm} au-dessus de l'eau à Morges. Or en réalité je n'arrivai à trouver la hauteur h', où le point visé était sur la ligne de l'horizon, qu'en plaçant mon œil à 2.25^{m}.

Ce jour-là $$\frac{h'}{h} = 5.2$$

ce qui est évidemment un rapport assez élevé.

F. Quant aux caractères accessoires qui accompagnent le mirage sur eau chaude, rapprochement du cercle de l'horizon, abaissement de l'horizon apparent, exagération de la courbure apparente de la nappe d'eau et dentelures des vagues à l'horizon, je les ai reconnus au mirage sur eau froide. Le 3 juillet 1894 à 12^{h}, par une température de l'air de 27.5°, le lac étant à environ 22°, les mirages sur eau froide étaient très nets ; il soufflait un petit rebat et j'ai vu très clairement les dentelures des vagues ; j'ai même aperçu des deux côtés du bateau à vapeur qui venait de St-Sulpice à Morges les vagues soulevées, suspendues en l'air comme celles que j'ai dessinées fig. 138, p. 522. Le lendemain, dans des conditions analogues, j'ai reconnu le raccourcissement évident du cercle de l'horizon. Le cercle de l'horizon passait à 2300^{m} quand j'avais l'œil à 2.25^{m} au-dessus de l'eau. Or à 2^{m} de hauteur de l'œil, la ligne de l'horizon, sans réfraction, passerait à plus de 5^{km}. Le 10 juillet, par des conditions assez semblables, j'ai noté que la courbure apparente du lac était évidemment très aggravée ; il soufflait un petit sudois.

G. Dans les mirages sur eau froide, j'ai constaté souvent une forte asymétrie de l'image réfléchie ; celle-ci est fortement réduite en hauteur et j'ai plusieurs fois dessiné sur mes notes l'aspect d'objets dont le

mirage n'avait que le $^1/_3$ ou le $^1/_4$ de la hauteur de l'image vraie. La figure 142 représente comme exemple une barque du Léman avec ses voiles en oreilles dont le mirage n'est point du tout égal à l'image vraie.

(Fig. 142.) Mirage sur eau froide. Asymétrie de l'image du mirage.

Ce qui vérifie bien cette réduction de l'image réfléchie du mirage, c'est son plus grand éclat ; elle apparaît plus brillamment éclairée que l'image vraie ; la même somme de lumière se répartissant sur une surface plus petite, cette apparence de plus grande illumination confirme l'impression, très nette en certains cas, de compression de l'image réfléchie. Cette observation a été répétée par MM. Ch. Dufour et Delebecque.

La réduction en hauteur de l'image réfléchie s'observe quelquefois dans le mirage sur eau chaude. Woltmann, Biot, Hubbart, Bravais l'ont déjà noté ; mais dans ce cas, la réduction m'a semblé beaucoup moins forte et moins fréquente que dans le mirage sur eau froide. Cette différence dans la hauteur de l'image réfléchie est le seul caractère qui me paraisse différencier ces deux ordres de mirages.

II. Cette réduction considérable de l'image réfléchie dans le cas du mirage sur eau froide pourrait faire confondre le phénomène avec celui que nous avons décrit sous le nom d'images de Ch. Dufour, soit la déformation d'un objet à l'horizon qui se réfléchit sur la surface sphéroïdale de la nappe lacustre (p. 509).

Il est cependant facile de les séparer, et je suis sûr de ne pas faire erreur en les décrivant comme deux choses bien distinctes. J'ai en effet observé ce mirage sur eau froide par des temps de brises assez fraîches pour agiter très nettement la surface de l'eau.

D'une autre part j'ai constaté, et M. A. Delebecque a vérifié ce détail, que tandis que le mirage était fort bien visible lorsque l'œil était près de la surface de l'eau à 1 ou 2^m au-dessus du lac, il disparaissait lorsque l'on s'élevait à 5^m, 10^m, 20^m au-dessus de cette nappe. Cette image est donc bien un mirage et non pas un phénomène de réflexion.

— Comment expliquer ce mirage sur eau froide, cette persistance du mirage dans le milieu des jours d'été alors que les rapports de température entre l'air et l'eau devraient l'avoir fait cesser, et sembleraient exiger l'apparition des réfractions sur eau froide ?

Deux solutions se présentent à ce problème, l'une et l'autre avec ses difficultés. Les voici telles que je les comprends :

1° La première hypothèse, dans laquelle je me rencontre avec l'opinion de J.-L. Soret, cherche l'explication dans des différences d'humidité. Il faudrait admettre une stratification des couches aériennes diversement chargées de vapeur d'eau, d'humidité croissante de haut en bas.

On sait en effet que la vapeur d'eau a un pouvoir de réfraction plus faible que celui de l'air. Un air plus humide doit donc réfracter les rayons lumineux plus faiblement qu'un air sec ; par conséquent un air stratifié suivant une humidité croissante doit agir dans le même sens qu'un air stratifié suivant une chaleur croissante.

Il serait donc admissible qu'un air plus humide à la surface de l'eau que dans les couches supérieures produisît les mêmes phénomènes optiques qu'un air stratifié thermiquement dans l'ordre inverse.

J'ai soumis la question à mon ami le professeur Ed. Hagenbach, de Bâle, et voici la réponse qu'il m'a donnée (16 mai 1889) :

« Le problème peut se traiter par le calcul en faisant une série de suppositions pour la température de l'air.

Prenons de l'air à 2° C. Admettons qu'au contact du lac il soit saturé d'humidité, tandis que les couches plus élevées soient très sèches, avec une humidité relative de 0.30.

La tension de la vapeur d'eau sera

dans l'air saturé, à	1.00	d'humidité relative		5.3mm
— sec, à	0.30	—		1.6
		différence		3.7

soit 0.005 de la pression atmosphérique.

L'indice de réfraction de l'air est	1.00029
— de la vapeur d'eau est	1.00026
différence	0.00003

Donc une quantité de 0.005 de vapeur d'eau diminuerait l'indice de réfraction de l'air de 0.000 000 15

D'un autre côté une élévation de température de 1° C. diminuerait l'indice de réfraction de l'air de 0.000 001

Donc dans ce cas une diminution de 0.000 000 15 dans l'indice de réfraction de l'air, due à la stratification d'humidité serait égale à l'action d'une stratification thermique où la différence de température serait de 0.15°.

Par le même calcul pour de l'air plus chaud, en admettant les mêmes différences d'humidité (saturation de l'air à la surface de l'eau, 0.30 d'humidité relative dans les couches supérieures), l'effet sur l'indice de réfraction de l'air serait égal :

pour de l'air à 10° à une différence de température de 0.26°
— à 20° — — 0.48°

Cet effet est donc d'autant plus fort que la température de l'air est plus élevée. »

Ainsi donc, d'après ces calculs de Hagenbach, l'effet d'une stratification d'humidité croissante de haut en bas a lieu, au point de vue des réfractions, dans le même sens que celui d'une stratification thermique de l'ordre inverse, chaleur de l'air croissant de haut en bas. Seulement cet effet est excessivement faible. Dans les conditions où nous avons observé nos mirages sur eau froide, par des températures de 10 à 20°, l'effet extrême de la stratification d'humidité ne peut dépasser celui de différences de température de $^1/_4$ à $^1/_2$ degré. Or nous avons vu que les différences entre la chaleur de l'air et celle de l'eau atteignent parfois 2, 4 ou 6 degrés et plus. Cette explication semble donc insuffisante.

2e hypothèse. La stratification thermique de l'air dans l'ordre inverse (avec les couches plus chaudes au-dessous des couches plus froides) qui existait dans la matinée alors que l'air était plus froid que l'eau, persisterait malgré le réchauffement de l'air à une température supérieure à celle de l'eau.

Pour cela il faudrait :

d'une part que les différentes couches d'air, sous l'influence des rayons solaires, élevassent leur température d'une quantité à peu près égale :

d'une autre part que l'action de refroidissement des couches inférieures au contact de l'eau restée plus froide fût nulle ou très lente.

En d'autres termes, il faudrait que le réchauffement de l'air par action solaire dépassât en intensité ou en vitesse le refroidissement des couches inférieures par l'effet du contact avec l'eau froide.

Nous aurions par exemple les stratifications successives que voici :

Air	12	13	14	15	16	17
	13	14	15	16	17	18
	14	15	16	17	18	17
	15	16	17	17	17	16
Eau	15	15	15	15	15	15
	Mirage sur eau chaude	Mirage sur eau froide.			Réfractions sur eau froide	

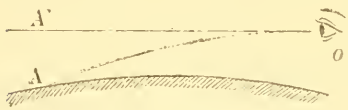
Est-ce possible? Est-ce admissible? Est-ce conciliable avec ce que nous avons vu de la rapidité prodigieuse de la production du mirage dans les réfractions sur eau chaude dans les cas de bise soufflant sur le lac au fond du golfe de Morges? (Voir page 526.)

Je soumets le problème, sans avoir la prétention de le résoudre, aux maîtres dans l'étude des réfractions et mirages.

II. **Réfractions sur eau froide.**

Lorsque l'air est plus chaud que la surface du lac, ses couches inférieures sont refroidies par contact avec l'eau, et elles se stratifient thermiquement dans l'ordre direct; c'est-à-dire que les couches froides, par conséquent les plus denses indépendamment de la compression, sont situées au-dessous des couches chaudes, plus légères.

Les rayons lumineux partant de la surface de l'eau pour arriver à notre œil, situé à quelques mètres au-dessus de la nappe du lac, ont à traverser des couches de moins en moins denses; ils sont réfractés et leur marche rectiligne se transforme en une courbe à concavité inférieure AO (fig. 143). Ils entrent dans notre œil suivant un angle moins incliné, plus rapproché de l'horizontale que s'il n'y avait pas de réfraction. L'objet A nous apparaît en A'.



(Fig. 143.) Réfractions sur eau froide.

Ces déviations des rayons lumineux amènent des déformations du paysage. Mais tandis que le mirage sur eau chaude est toujours identique à lui-même et, quoique différent d'intensité, ne présente jamais de cas aberrants, les réfractions sur eau froide sont essentiellement polymorphes. Après donc que nous aurons décrit le phénomène simple, tel qu'il s'offre normalement à notre observation, nous aurons à citer plusieurs apparitions accidentelles, peu fréquentes, souvent très étranges et très compliquées.

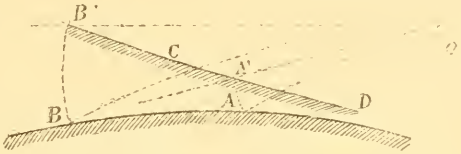
Phénomènes normaux.

Comme dans les réfractions sur eau chaude, nous avons à distinguer deux ordres de phénomènes dus aux réfractions sur eau froide. [1]

[1] Je ne reviens pas sur ce que j'ai dit p. 532 des mirages sur eau froide.

A. *Apparence de la nappe d'eau en dedans du cercle de l'horizon.*

1° La surface de la nappe du lac, au lieu de montrer une exagération de la sphéroïdicité comme c'était le cas dans les réfractions sur eau chaude, paraît plane ou même concave. Cela provient de ce que la déviation est d'autant plus forte que le rayon lumineux traverse les plans de séparation des couches stratifiées suivant un angle plus faible.



(Fig. 144.) Apparence concave de la nappe d'eau.

Soient A et B (fig. 144) deux points inégalement distants sur la surface du lac. Le point A plus rapproché envoie un rayon qui sera moins dévié, et apparaîtra en A', le point B plus éloigné paraîtra plus soulevé, et l'angle BOB' sera plus grand que AOA'. La nappe du lac prendra à nos regards la position de la surface courbe $B'C\ A'D$ et nous semblera concave.

2° Le plan de l'horizon paraît relevé. Le point B apparaît en B', notablement au-dessus de la position de l'horizon réel.

3° Le cercle de l'horizon est éloigné. Soit OA, fig. 145, la tangente à l'horizon pour l'œil O; le point D situé au-delà de l'horizon réel A envoie un rayon lumineux qui, par le fait de la réfraction, arrive à notre œil. Nous voyons donc des parties du lac qui, sans la réfraction, seraient restées au-delà du cercle de l'horizon et auraient été par conséquent masquées à notre vue.

(Fig. 145.) Agrandissement du cercle de l'horizon.

La réfraction n'arrive cependant pas à éloigner indéfiniment le cercle de l'horizon. Par les plus belles réfractions du printemps, nous ne voyons pas la grève à vingt ou trente kilomètres de distance, et le corps d'une barque qui navigue dans ces régions éloignées reste masqué à notre vue, alors même que la nappe du lac nous semble concave et paraît se relever jusqu'à la rive de la côte opposée. Alors même que, à la réfraction normale, s'additionne la réfraction sur eau froide qui agit dans le même sens, l'incurvation du rayon lumineux à concavité

inférieure n'arrive pas à dépasser en courbure celle du grand cercle de la terre.

Je ne crois pas faire erreur sur ce point. Mais la difficulté des observations en temps de réfractions sur eau froide est souvent telle que je fais mes réserves sur la rigueur de cette dernière affirmation.

4° Les objets situés sur l'eau en dedans du cercle de l'horizon apparent sont déprimés. Le corps d'une barque ou d'un bateau est réduit en hauteur; souvent il ne paraît plus qu'un trait horizontal, presque sans épaisseur.

B. *Apparence des objets situés en dehors du cercle de l'horizon réel.*

1° Les objets extérieurs à l'eau, situés au-delà du cercle de l'horizon réel, et au-dessous du plan tangent de notre œil à la nappe liquide, qui en l'absence de réfractions seraient invisibles pour nous, ont leurs rayons lumineux déviés suivant des courbes à concavité inférieure : ils peuvent donc surmonter l'obstacle que leur oppose l'intumescence de la rotondité de la terre, leur image est relevée, et ils deviennent visibles.

C'est ainsi que sitôt que les réfractions sur eau froide se développent, nous apercevons les barques qui naviguent au-delà du cercle de l'horizon : nous voyons les parties basses de la côte opposée émerger au-dessus du plan de l'horizon et apparaître, alors que normalement elles eussent dû être absolument masquées. Lorsque nous sommes sur la grève de Morges, nous apercevons ainsi les maisons de Vevey, de Montreux, de Villeneuve, la plaine du Rhône, qui s'élèvent au-dessus de la nappe de l'horizon, soulevées par le pouvoir des réfractions.

C'est cette apparition qui fut la première cause des études intéressantes faites par les riverains du Léman sur les réfractions et les mirages. Elle a fait l'objet d'un pari qui est resté célèbre dans les souvenirs des physiciens de Morges. C'était par un jour d'été en 1851. Le colonel Fritz Burnier et le professeur Alexandre Yersin discutaient sur le quai du port de Morges. « On ne voit pas aujourd'hui le château de Chillon », disait Yersin. — « On ne peut pas le voir » répondait Burnier. — « Mais je l'ai vu hier. » — « Vous vous êtes trompé », reprenait le colonel ; et un calcul improvisé prouvait à son interlocuteur qu'un rayon visuel, partant de Morges à 2^{m} au-dessus

de l'eau, devient tangent à 5^{km} de distance, et que à Chillon, à 35^{km} de Morges, il passe à 71^{m} au-dessus du lac. Le château de Chillon n'a que 45^{m} de hauteur ; donc il reste caché par la rotondité de la terre. — « Mais je l'ai vu » répétait Yersin. — Un pari fut noué ; et quelques jours plus tard la bouteille de bière fut solennellement vidée devant l'image parfaitement nette du château de Chillon, aux frais du mathématicien dont les calculs, incontestablement exacts, avaient eu cependant tort devant l'observation des faits. M. Ch. Dufour, alors maître au collège d'Orbe, assistait à la solution du pari et, quand l'année suivante il vint s'établir à Morges, son premier soin fut d'observer attentivement les mirages. De là ses études sur le mirage et la Fata-morgana en 1854 (1) où il nous donna l'explication de ces alternances d'apparition et de disparition du château de Chillon, quand on le regarde de Morges. De là les recherches de son frère Louis Dufour, en 1854 et 1855, sur les mirages vus de Villeneuve. (2)

2° Les objets situés au-delà du cercle de l'horizon et bas sur l'eau sont déformés ; ils apparaissent déprimés, aplatis ; leurs dimensions verticales sont sensiblement réduites. Cela résulte des variations de la réfraction qui décroît à mesure que les rayons lumineux traversent les couches réfringentes suivant un angle plus incliné. Les corps très bas au-dessus de l'horizon sont fortement réfractés ; ils sont puissamment soulevés ; ceux qui sont plus élevés sont moins réfractés ou ne le sont plus du tout. Il s'en suit une diminution de la hauteur apparente des objets. Les masses lumineuses de la côte opposée prennent des formes aplaties, déprimées, toutes particulières, caractéristiques des réfractions sur eau froide ; les apparences qu'elles prennent alors permettent de diagnostiquer ces réfractions au premier regard de celui qui connait l'aspect normal du paysage.

Phénomènes accidentels en temps de réfraction sur eau froide.

Outre ces apparitions que je puis appeler normales, qui sont caractéristiques des réfractions sur eau froide, il en est d'autres que je traiterai d'accidentelles. Les unes sont assez fréquentes et se répètent assez souvent pour que je puisse leur donner un nom et les appeler

(1) Bull. S. V. S. N. IV, 129.

(2) Bull. S. V. S. N. IV, 388, V, 26.

Fata-morgana et Fata-brumosa ; les autres sont tellement rares, que je n'essaierai pas de les définir ; je me bornerai à les décrire ou à les figurer.

La Fata-morgana.

Le phénomène le plus fréquent, le plus considérable parmi les apparitions accidentelles en temps des réfractions sur eau froide, est celui que l'on désigne sous le nom de Fata morgana.

A la jonction de la côte opposée avec la nappe du lac, *a*, fig. 146, on voit se développer une bande horizontale, *b*, aux contours peu nets,

(Fig. 146.) Fata-morgana, 25 mai 1880 à 12h 30m ; vue de Morges.

peu éclairée, striée de raies verticales, comme découpée en rectangles juxtaposés. Au-dessus de cette zone, la côte mieux éclairée, *c*, avec ses détails plus ou moins distincts, est fortement déprimée, et les traits de son paysage sont altérés ; les dimensions verticales y sont réduites comme dans les réfractions sur eau froide ordinaires.

La bande inférieure, que j'appellerai la zone striée de la Fata-morgana, est très remarquable et son aspect est caractéristique. Elle est limitée en bas par le plan du lac qui forme sa ligne inférieure, en haut par une ligne plus ou moins bien dessinée, généralement horizontale. Ces deux lignes sont ordinairement parallèles ; parfois elles se rapprochent ou s'écartent légèrement aux extrémités de la bande.

L'éclairage de la zone striée est, comme l'a indiqué M. Ch. Dufour, plus sombre que celui du lac sous-jacent ou de la côte superposée. Les raies alternativement brillantes et sombres, diversement colorées, tantôt larges, tantôt étroites, irrégulières, sont parfaitement verticales ; mais leurs contours sont indécis, et elles n'ont pas la netteté des objets réels visibles sur la côte elle-même. L'épaisseur de la zone striée varie, suivant les cas, de 2 à 5 et même 10 minutes de degré.

Suivant la fantaisie de l'observateur, il la comparera à une falaise gigantesque qui borderait la rive, ou bien à une ville enchantée. Il

n'est pas besoin de beaucoup d'imagination pour qu'on se figure voir, dans ces masses confusément éclairées et qui paraissent sortir de la brume, les lignes des quais, les massifs de maisons, les monuments diversement lumineux et colorés d'une cité gigantesque apparaissant, de par la baguette magique d'une fée, sur une côte où nous savons que rien de pareil n'existe, sur une rive peut-être inhabitée, comme la plaine du Rhône entre le Bouveret et Villeneuve. La langue colorée des Italiens a donné à ces apparitions le nom de palais de la Fée Morgane et le terme de Fata-morgana est resté dans l'histoire scientifique des mirages. (1)

La plus belle des villes enchantées de la Fée Morgane dont je me souvienne, nous est apparue, en mars 1867 si je ne me trompe, à l'entrée du Petit-lac (2), comme par une splendide après-midi de printemps nous arrivions à la pointe d'Yvoire, sur le yacht *le Caprice*. Le soleil était brillant, l'air chargé de brumes qui dessinaient merveilleusement les divers plans. Tout le fond du Petit-lac, de la pointe d'Hermance jusqu'à Coppet, nous semblait bordé par les quais indéfiniment prolongés d'une cité gigantesque, une ville de Genève qui aurait pris les dimensions d'un Pékin ou d'un Londres. L'illusion était saisissante, et aucun des passagers du *Caprice* n'échappa à l'émotion que provoquait ce spectacle fantastique.

J'en ai vu une bien belle aussi, le 22 avril 1888, lorsque assis sur la plage de Carthage, à l'entrée du golfe de Tunis, je regardais, par-dessus la Méditerranée d'azur, la côte du Dakhelat-el-Maouïn, et spécialement le village de Hammam-Kourbès. Cette observation a eu pour moi l'intérêt de me prouver que la Fée Morgane n'est pas plus fantaisiste dans ces contrées méridionales que sur les eaux du Léman, que ses constructions magiques sont aussi belles chez nous que dans la patrie classique des mirages.

(1) C'est à M. Ch. Dufour que nous devons le rapprochement aujourd'hui admis généralement entre les apparitions qui nous occupent et les images décrites par les naturalistes de Messine. Bull. S. V. S. N., IV, 134.

(2) J'ai bien souvent noté les visions fantasques de la Fée Morgane ; chaque printemps, dans mes promenades, sur les quais de Morges, j'en admire plusieurs apparitions. Mais les plus belles, les plus nettes dont je me souvienne, sont certainement celles qui se sont développées devant moi dans cette région du Petit-lac, à partir du détroit de Promenthoux. Sont-ce les conditions thermiques qui y sont particulièrement favorables, ou bien la distance plus rapprochée de la côte opposée aide-t-elle à la production du phénomène ?

Cherchons, dans les détails constants de l'apparition ou dans quelques observations spéciales, quelques indications qui nous rapprochent d'une explication du phénomène.

1° Tout d'abord le fait général et sans exception, c'est que les apparitions de la Fata-morgana n'ont lieu qu'en temps de réfractions sur eau froide. C'est au milieu d'une de ces belles après-midi de printemps ou d'été, par un temps de grand calme, avec peut-être quelques souffles d'air locaux, quand le lac paraît concave, que l'on voit se développer presque subitement à l'horizon les bandes striées qui simulent les palais de la Fée Morgane.

Je ne puis pas confirmer l'affirmation de Brydone [1] qui, après avoir été témoin du phénomène en 1770, prétend qu'il se produit après que l'air fortement échauffé a été agité par des vents violents qui l'ont ensuite abandonné dans un calme plat. La phrase soulignée par moi ne répond ni à mes notes, ni à mes souvenirs ; je la transformerai dans les termes suivants : l'air fortement échauffé et traversé localement par un léger courant d'air, au milieu d'un lac au calme plat. M. Ch. Dufour est d'accord avec moi sur ce point ; il ajoute cependant que la présence de nuages limités traversant un ciel serein est une des conditions nécessaires de la Fata-morgana.

2° Les apparitions de la Fata-morgana n'ont pas lieu simultanément sur toute la circonférence de l'horizon ; elles sont locales et non générales. Assez limitées, elles occupent un secteur de l'horizon de quelque 5, 10 ou 15 degrés. Par exemple, vues de Morges, elles envahissent la côte d'Ouchy à Vevey, ou de Cully à Villeneuve, ou de Montreux au Bouveret, etc. Le reste de l'horizon présente pendant ce temps les réfractions ordinaires sur eau froide, avec lac concave, avec soulèvement et aplatissement de la côte opposée. — Cette localisation du phénomène de la Fata-morgana prouve déjà que son origine ne doit pas être cherchée dans les conditions de position de l'observateur, car alors l'apparition serait uniforme sur tout l'horizon, elle doit au contraire résider en des conditions locales de l'atmosphère dans la direction où a lieu l'apparition, ou bien au point où les rayons partis de la côte opposée sont tangents à la surface du lac, ou bien au point de départ de ces rayons à la côte opposée.

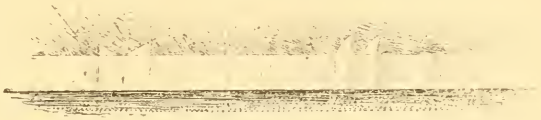
3° La Fata-morgana se déplace lentement par un mouvement d'en-

[1] Cité dans Daguin, traité de Physique, IV, 107. Paris, 1879.

semble, dans une direction déterminée, un jour vers la droite, une autre fois vers la gauche ; ce déplacement, qui a lieu avec une majestueuse lenteur, semble être causé par un coup de vent qui promènerait le phénomène à la surface du lac. Je crois avoir constaté que le déplacement de la Fata-morgana a lieu dans le sens des brises qui, ainsi que je l'ai dit, accompagnent le phénomène.

4° Les lignes verticales de la zone striée que sont-elles ? Sont-ce de simples traits lumineux, sans réalité, formés par les jeux de lumière, ou bien correspondent-elles à des objets existant sur la côte et déformés par les réfractions ? Ch. Dufour a déjà répondu à cette question en reconnaissant au milieu de la Fata-morgana les maisons de la Tour-de-Peilz. C'est donc la dernière alternative qui est exacte. Je donnerai encore deux preuves de la justesse de cette interprétation.

La première, c'est l'apparition, au milieu de la Fata-morgana, des barques ou bateaux naviguant dans l'éloignement, fig. 147 ; ils sont déformés, transformés en des rectangles étirés du haut, mais ils sont parfaitement reconnaissables, et les rectangles blancs ou noirs qui les représentent correspondent à des objets réels. Nous pouvons le vérifier si, nous élevant suffisamment au-dessus du lac pour sortir de la couche des réfractions, nous voyons non altérés les bateaux qui, vus du bord de l'eau, avaient des apparences et des formes fantastiques.



(Fig. 147.) Fata-morgana. Voiles latines prises dans la zone striée, 4 juin 1888.

La seconde preuve, c'est l'immobilité de ces masses lumineuses de la zone striée. Si celles-ci étaient le résultat de jeux de lumière sans base matérielle, elles se déplaceraient incessamment et n'auraient point de position fixe.

Toutes nos observations nous montrent dans la zone striée une déformation en hauteur de masses, de lignes, de points réels de la côte opposée. Tous ces objets sont comme étirés par une distension forcée.

5° Un point très important à déterminer est celui-ci : la bande striée de la Fata-morgana est-elle au-dessus ou au-dessous de l'horizon apparent du lac ? Autrement dit, le plan de l'horizon dans la partie où ont lieu les réfractions simples sur eau froide se continue-t-il avec

la ligne supérieure ou avec la ligne inférieure de la zone striée?

Suivant que l'une ou l'autre réponse sera donnée à la question, le problème changera de face. Si la Fata-morgana est au-dessus du plan de l'horizon, nous devrons en chercher la cause dans une exagération locale des réfractions qui soulèvent les objets éloignés par une trajectoire à concavité inférieure. Si la Fata-morgana est au-dessous du plan de l'horizon, l'horizon d'eau étant moins soulevé en ce point que dans le reste du pourtour du lac, la cause du phénomène sera dans une disparition locale des réfractions sur eau froide. La question est donc capitale, et l'observation seule peut lui donner réponse. Cette observation est difficile. Pendant bien des années, je l'ai poursuivie en vain, sans arriver à trouver de faits démonstratifs. Je suis enfin parvenu à me faire une conviction dans l'observation du cas suivant qui m'a paru parfaitement clair.

Le 7 avril 1889, à 15 $^1/_2{}^h$, une belle Fata-morgana était visible de Morges, dans la direction Ouchy-Lutry. Elle présentait l'aspect de la figure 148. A droite, le lac montrait les réfractions sur eau froide, le

(Fig. 148.) Fata-morgana. Abaissement du plan de l'horizon sous la zone striée.

plan du lac semblait concave et la ligne de l'horizon était fortement soulevée. Cette ligne de l'horizon se continuait à gauche en formant la limite supérieure de la zone striée de la Fata-morgana. La limite inférieure de cette zone était constituée par l'horizon du lac non soulevé, qui se rejoignait par une ligne oblique ascendante avec l'horizon soulevé de la partie droite du tableau. Sur cette ligne du lac non soulevé, on voyait, dans un premier plan, se dessiner la pointe de la Venoge, avec ses arbres (à 3^{km} de distance), et un bateau à vapeur partant de St-Sulpice, l'un et l'autre dans leur figure naturelle, et ne paraissant aucunement déformés par les réfractions.

J'interprèterai l'observation comme suit :

a. Au-dessus de l'horizon, sur l'ensemble du lac, il règnait les conditions des réfractions sur eau froide.

b. Ces mêmes conditions règnaient sur la nappe du lac, en dedans

du cercle de l'horizon, à droite de la Fata-morgana : la nappe du lac était soulevée et concave.

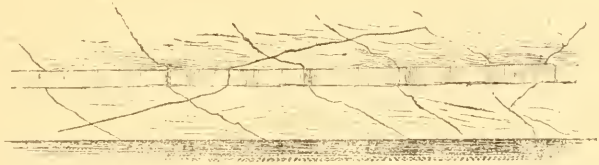
c. Elles régnaient au-dessus de l'horizon dans la direction de la Fata-morgana ; la côte opposée était soulevée et déprimée.

d. Dans la direction de la Fata-morgana, sur la nappe du lac, en dedans du cercle de l'horizon, il régnait, au contraire, les conditions de la réfraction sur eau chaude ; la surface du lac était affaissée (je n'ai pas noté si elle avait sa convexité exagérée, et si les dentelures des vagues apparaissaient à l'horizon).

e. Quant à la zone striée de la Fata-morgana, c'était un espace sans plan postérieur en vue ; la nappe du lac apparaissait au-dessous ; au-dessus, c'était la partie visible et en vue de la côte opposée. Cette zone striée représentait, si l'on veut, un trou dans le champ visuel, une partie sans objets faisant image.

Si cette interprétation est exacte, il y aurait eu en ce cas, dans la région de la Fata-morgana, pour les parties élevées au-dessus de l'horizon, réfractions à concavité inférieure, qui les soulevaient ; pour les parties en dedans du cercle de l'horizon, ou réfraction plus faible, ou absence de réfractions, ou réfractions à concavité supérieure, qui leur donnaient un abaissement relatif ou absolu.

Je suis confirmé dans cette opinion par des observations qui me paraissent fort importantes ; je les ai faites à 4 ou 5 reprises, et toujours dans la direction de La Vaux et de Vevey (c'est la partie du panorama de Morges qui est le mieux éclairée aux heures où le phénomène se montre). Dans ces observations, la zone striée de la Fata-morgana

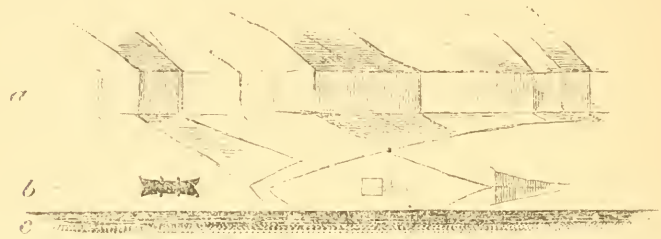


(Fig. 149.) Zone striée de la Fata-morgana, apparaissant sur les flancs de La Vaux. Morges, 14 mai 1879.

apparaissait, non pas en contact avec la nappe du lac, mais à une certaine hauteur. Sur les flancs de La Vaux, à mi-hauteur, une large zone striée verticalement coupait le paysage ; les lignes obliques dessinées par les chemins et les murs de vignes, les surfaces éclairées des différentes vignes étaient interrompues comme par une falaise gigantesque

de cinquante ou de cent mètres de hauteur, les lignes et les surfaces lumineuses se continuant au-dessous dans la direction primitive, mais avec un décrochement, suivant l'expression des géologues, très manifeste (fig. 149, p. 549). Ici encore, il semble que les parties supérieures soient soulevées, les parties inférieures abaissées, et que la zone striée soit le plan limite de ces réfractions opposées, étiré en hauteur.

Une observation plus complète est celle que j'ai faite le 27 juin 1879, à 16h20, dans la direction de Cully. Je la représente fig. 150. Comme



(Fig. 150.) Observation du 27 juin 1879, vue de Morges. La zone striée à mi-hauteur de La Vaux, et les réfractions sur eau chaude avec mirage au niveau du lac.

dans les cas précédents, une zone striée de la Fata-morgana, *a*, traversait à mi-côte les flancs de La Vaux; mais en plus, j'ai constaté avec sûreté et netteté l'apparition du mirage des réfractions sur eau chaude, *b*, du vrai mirage du désert dans les parties en contact avec le lac, *c*. Il y avait manifestement dans les parties basses les conditions des réfractions sur eau chaude.

Si ces notions sont exactes et peuvent s'étendre à la généralité des cas de Fata-morgana, de la Fata-morgana au niveau du lac, ce phénomène serait dû à la superposition de deux ordres de réfraction; en haut, les réfractions à concavité inférieure, causées par une stratification d'ordre direct, en bas, les réfractions à concavité supérieure causées par une stratification d'ordre inverse; dans le plan limite entre ces deux ordres de déviation, extension en hauteur des objets constituant la ligne inférieure de la partie en vue, et formation de la zone striée. La figure 151 donnera

(Fig. 151.) Superposition hypothétique des deux types de réfraction.

une idée de l'hypothèse que j'énonce ici. Un point A au-dessus de l'horizon apparent serait soulevé par la trajectoire à concavité inférieure des rayons qu'il émet et apparaîtrait en A'. Un point B sur le cercle de l'horizon apparent serait abaissé et paraîtrait en B' par suite de la trajectoire à concavité supérieure des rayons qu'il renvoie. L'angle α, entre le plan de l'horizon apparent, B', et le plan inférieur des premières masses visibles sur la côte opposée, A', donnerait la hauteur de la zone striée de la Fata-morgana.

Est-ce possible ? Une telle superposition de stratifications opposées est-elle admissible ? Une telle complication de réfractions différentes peut-elle faire image simultanément dans notre œil ? C'est aux physiciens et aux mathématiciens à juger si cette explication très simple des faits observés se prête aux nécessités de l'optique.

— Comment se fait l'extension en hauteur des objets qui remplissent la zone striée de la Fata-morgana ? Je n'ose pas essayer d'en rendre compte ; je me borne à reproduire l'explication qu'en a donnée, en 1854, M. le professeur Ch. Dufour [loc. cit. p. 545].

Après avoir montré comment, par les réfractions sur l'eau froide, les objets situés à une certaine hauteur sont déprimés, il continue dans ces termes : « Supposons le cas d'un objet situé plus près du rivage, tel que certaines maisons de la Tour-de-Peilz, peu élevées au-dessus du lac, qui de Morges se voient presque à fleur d'eau. La partie supérieure de la maison paraît élevée par le fait de la réfraction, tandis que la partie inférieure, déjà plongée dans la zone froide qui avoisine le lac, ne participe pas à ce déplacement. En conséquence, pour un tel objet, la partie supérieure est relevée, la partie inférieure ne l'est pas. Donc l'objet est amplifié dans le sens vertical. »

J'ajouterai que M. l'ingénieur Delebecque a donné une explication tout autre de la Fata-morgana qu'il attribue à une superposition de 3 ou 5 mirages alternativement directs et inverses. Mais il me semble que sa théorie se rapporte à d'autres apparitions ; je la reproduirai quand j'arriverai à la description de ces phénomènes.

La Fata-brumosa.

Un second type d'apparitions est assez fréquent pour que j'en puisse donner une description. Qu'il me soit permis de suivre la gracieuse

imagination des Italiens et de mettre sous l'invocation d'une autre fée, la fée des brouillards, ces visions fugitives, sans corps ou sans réalité! Je l'appelle Fata-brumosa.

Je l'ai observée dans des conditions analogues à celles de la Fata-morgana, dans des après-midi chaudes et calmes de belles journées de printemps (8 avril 1889, 9 et 12 mai 1890, etc.). Je trouve cependant dans mes notes l'indication de légères brises, ou plutôt de bouffées d'air locales soufflant irrégulièrement sur le lac.

L'apparition consiste essentiellement en un simulacre de brouillards s'élevant par places au-dessus du lac, ces brouillards n'ayant du reste aucune réalité et n'étant que des jeux optiques. Le lac est blanc, la côte opposée grise; les pseudo-brouillards ont exactement la teinte du lac, tellement qu'en certains cas ils semblent des vagues gigantesques soulevant la surface du lac.

Le 8 avril 1889, à 16h40, vue du quai du château de Morges, on

(Fig. 152.) Fata-brumosa, vue de Morges, 8 avril 1889.

aurait dit une épouvantable inondation, un ras de marée gigantesque arrivant de Genève, et ravageant la côte de Savoie, vers Thonon et la Drance, sous sa vague destructive de dix ou vingt mètres de haut qui recouvrait successivement les maisons et arbres de la rive (fig. 152). (1)

D'autres fois les brouillards sont plus limités; ils semblent flotter dans l'air (fig. 153).

(Fig. 153.) Fata-brumosa. Morges, 12 mai 1890, 12h.

Le phénomène est du reste peu élevé; je l'évalue au plus à 2 ou 4 minutes de degré.

(1) Dans cette figure, il y a évidemment une erreur. Les deux pseudo-vagues du pseudo-mascaret ne devaient pas s'élever au-dessus du plan général de la Fata-brumosa: mon croquis a dessiné plutôt l'impression que je subissais plutôt que la réalité que je voyais. Je n'ose cependant pas corriger ce dessin, l'image ayant disparu et ne s'étant plus reproduite à mes yeux.

Ces faux-brouillards ne sont pas simplement, comme je l'ai cru d'abord, un relèvement local du plan de l'horizon d'eau ; en effet, j'ai vu le 12 mai 1890 les étages inférieurs d'une maison qui m'apparaissaient nettement un instant auparavant, être masqués par la masse des pseudo-brouillards qui s'avançaient au-devant de la dite maison (fig. 152.)

Un des caractères les plus évidents dans tous les cas de Fata-brumosa que j'ai observés, est l'irrégularité apparente de l'horizon du lac ; au lieu de dessiner une ligne droite, nette et tranchée, il est ondulé, irrégulièrement bosselé, oscillant, vibrant.

Ces brouillards n'ont rien de réel : si l'observateur s'élève en plus de un ou deux mètres au-dessus de l'eau, ils s'évanouissent sans laisser de traces.

Aussi bien les pseudo-brouillards que les ondulations de la ligne de l'horizon, se déplacent progressivement dans le sens des airs de vent qui soufflent sur le lac. Ce déplacement m'a semblé plus rapide que celui que j'ai signalé dans la Fata-morgana.

Ajoutons enfin que cette Fata-brumosa peut coexister avec la Fata-morgana. La zone striée de cette dernière apparition peut se voir à côté des simulacres de brouillards de la Fata-brumosa ; celle-ci représente alors la partie élevée de l'horizon qui limite de côté la zone striée de la Fata-morgana.

Mirages et déformations diverses en temps de réfractions sur eau froide.

Les déformations des objets à l'horizon en temps de réfraction sur eau froide sont parfois très bizarres, très variées et diverses. Elles sont difficiles à décrire et difficiles à figurer, car elles sont presque insaisissables ; elles ne durent qu'un instant, elles se modifient très rapidement et leurs contours sont essentiellement indécis. Elles se répètent rarement de la même manière : elles sont d'apparition si fugace et si peu précise que je n'essaierai pas d'en déterminer les conditions. Je me bornerai à tenter d'en figurer quelques-unes, telles que je les ai observées à l'œil nu, avec une bonne jumelle ou avec une lunette d'approche [1]. Vu la difficulté de l'observation, je n'ose attribuer une

[1] Les images sont très peu nettes ; il faut éviter d'employer pour leur étude des grossissements trop forts.

rigueur absolue à ces dessins ; ils représentent ce que je crois avoir vu.

1° Une des apparitions les plus fréquentes, quoique très variable dans ses détails, est la suivante : l'image d'un bateau naviguant à distance est démesurément épaissie dans ses étages inférieurs, et renfoncée ou diminuée dans ses étages supérieurs.

Ainsi fig. 154, le 14 avril 1880, à 12^h35, température de l'air 17.2°, de l'eau C^a 10°, j'avais l'œil à 3^m au-dessus de l'eau ; je regardais un bateau à vapeur s'approchant de Morges, à 3^{km} de distance devant la pointe de la Venoge. L'horizon apparent était soulevé derrière ces premiers plans, et le haut de la cheminée du bateau à vapeur, qui s'élève à 6 ou 8^m au-dessus de l'eau, était renfoncé jusqu'à la ligne de l'horizon apparent.

(Fig. 154.) Aplatissement de l'image d'un bateau à vapeur. Morges, 14 avril 1880.

La fig. 155 donne un cas assez analogue, plus étrange encore. Le 31 mai 1879, à 18^h10, le bateau à vapeur *Le Rhône*, traversait d'Evian à Ouchy, à 10^{km} des quais de Morges ; le corps du bateau était énormément épaissi ; les voiles latines d'une barque marchande qui croisait à une plus grande distance étaient en revanche ridiculement rapetissées.

(Fig. 155.) Epaississement des parties inférieures, aplatissement des parties supérieures de l'image. Morges, 31 mai 1879.

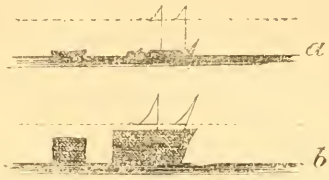
Qui eût reconnu dans la fig. 156 le dessin des barques marchandes du Léman, avec leurs gracieuses voiles latines ? C'était cependant un de ces bateaux, remorquant son canot de sauvetage, qui traversait de Savoie en Suisse, le 4 mars 1880, à 14^h.

(Fig. 156.) Déformation de l'image d'une barque marchande. Morges, 4 mars 1880.

Dans ce cas, comme en général pour tous ces phénomènes de mirages et réfractions anormales, l'apparence de l'image est fort différente suivant la position de l'œil à une hauteur plus ou moins grande au-dessus de l'eau. Ainsi la fig. 157, p. 555, donne dans le dessin *a* une barque vue du pont d'un bateau à vapeur, à 3^m environ au-dessus de l'eau ; le dessin *b*, la même barque vue de la passerelle du pilote, à 2^m5 plus

haut. C'était le 2 mai 1887, à 14h, dans les parages de Coppet-Versoix.

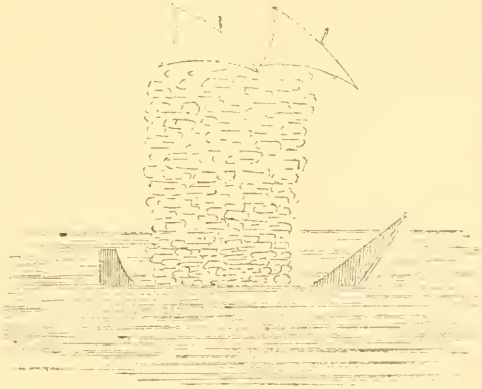
2° Quand la Fata-morgana règne dans les arrière-plans, un bateau naviguant à mi-distance présente souvent des déformations extraordinaires. On reconnaîtrait à peine les voiles latines de nos barques marchandes dans les rectangles surmontés de triangles de la fig. 158. La barque était vue de Morges, à mi-lac, dans la direction d'Anthy, le 22 mai 1882, à 14h.



(Fig. 157.) Barque marchande déformée par les réfractions sur eau froide. Vue en *a* du pont du navire, et en *b* de la passerelle du pilote. Versoix, 2 mai 1887.

C'est dans cet ordre de déformations que doit rentrer la singulière observation faite par Emmanuel Solomiac, en mars 1854, et qui est décrite tout au long par M. Ch. Dufour (1). Je dois à l'obligeance de M. Dufour communication du croquis de Solomiac et je le reproduis fig. 159. La barque marchande était chargée de bois et les piles de bûches ne s'élevaient certainement pas à plus de 3m au-dessus du lac; elles paraissaient énormément amplifiées en hauteur, tandis que les voiles latines, dont le sommet pouvait atteindre à 20m sur l'eau, étaient réduites dans l'image à deux petits triangles surbaissés. Autre détail intéressant, l'image était remarquablement nette dans ses parties inférieures, très confuse dans ses parties supérieures.

(Fig. 158.) Barque marchande vue dans la zone striée de la Fata-morgana. Morges 22 mai 1882.

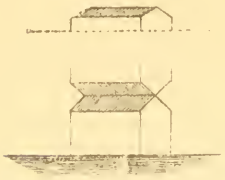


(Fig. 159.) Barque marchande déformée par les réfractions sur eau froide. Morges, mars 1854 (croquis d'E. Solomiac).

3° Je rangerai enfin dans les catégories de mirages compliqués avec

(1) [Loc. cit. p. 545], p. 135.

superposition de plusieurs images alternativement redressées et renversées, le dessin suivant que je retrouve dans mes notes, sans détails explicatifs (fig. 160), du 1er août 1854; c'était, si je la reconnais bien, une maison de Lugrin ou de la Grande-Rive, sur la côte de Savoie, à l'est d'Evian. C'est le cas le plus parfait que j'aie d'un mirage avec superposition de trois images, dont une seule réelle.



(Fig. 160.) Mirage inférieur double. Morges 1er août 1854.

M. Ch. Dufour (1) donne un dessin analogue d'une barque que je reproduis fig. 161. C'était vu de Morges le 25 mars 1854, à 16h, température de l'air 9.9°, du lac 5.6°. Les apparitions de mirage au-dessous de l'image réelle ne tardèrent pas à se dissoudre en se découpant en segments superposés.

(Fig. 161.) Mirage inférieur double. Morges 25 mars 1854 (croquis de M. Ch. Dufour).

La fig. 162 montre le château de Chillon, vu de Morges le 4 juin 1888, à 17h. Il semble y avoir, comme dans les cas précédents, superposition de plusieurs images de mirage. Malheureusement, je ne disposais à ce moment que d'une jumelle, et je n'ai pas pu analyser les caractères de ces images, du reste assez indistinctes, vu l'éloignement considérable, 35km.

Ma fig. 163 représente une barque marchande, à voiles latines, singulièrement déformée dans l'image réelle, et offrant une seconde image parallèle, située au-dessous de la première. Les trois croquis figurent cette barque à trois moments successifs, à 14h, 14h15 et 15h, le 4 mars 1880, pendant que le mirage se dissipait ou se transformait.

(Fig. 162.) Château de Chillon vu de Morges, avec mirage inférieur. 4 juin 1888.

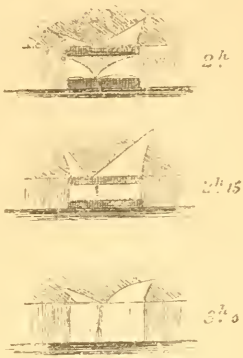
Tandis que tous les cas précédents donnaient des mirages inférieurs, l'image qui paraissait réelle étant au-dessus des images de mirage, dans la fig. 164 j'ai un cas de mirage supérieur. Le 27 juin 1879, à 16h20, le bateau à vapeur le *Bonivard* traversait d'Ouchy à Evian, à 10km environ de Morges. Les tambours, cheminées et tentes du bateau se reproduisaient au-dessus de l'image réelle en un mirage très élégant.

Il est, du reste, fort difficile de discerner ce qui est image réelle ou

(1) [Loc. cit. p. 545.]

image de mirage, de dire si le mirage est supérieur ou inférieur. Quand l'apparition est assez nette, on peut mieux reconnaître si le mirage est symétrique ou parallèle, si l'image du mirage est droite ou renversée. Mais ces visions sont, en général, fort indistinctes et, le plus souvent, on ne peut se prononcer avec certitude.

Je donne encore ici, fig. 165, p. 558, les croquis successifs faits le 15 avril 1894, à 16h30 ; le château de Chillon se déformait devant nos yeux pendant que nous le dessinions sur les quais de Morges. On voit combien l'image est instable et variable.



(Fig. 163.) Barque marchande avec mirage inférieur parallèle. 3 croquis successifs. Morges 4 mars 1880.

N'est-ce pas à des cas de ce genre que se rapporte l'explication que M. A. Delebecque a donnée en 1892 de la Fata Morgana ? Je reproduis intégralement cette théorie :

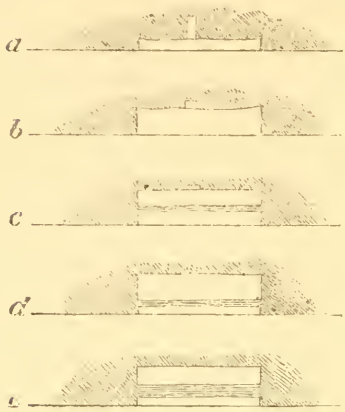
(1) « Lorsque l'air est plus chaud que l'eau, nous observons en général le mirage connu sous le nom de mirage d'eau froide (2) ; les objets lointains ont leurs dimensions verticales réduites ; en même temps l'horizon apparent se relève. Le calcul explique très bien les effets de ce mirage d'eau froide (voir Bravais, Notice sur le mirage, 1852). Comment se fait-il que lorsque la différence de température entre l'air et l'eau devient très forte, nous observions un agrandissement considérable des objets, contrairement à ce qui se passe dans le mirage d'eau froide ordinaire ? En regardant attentivement le phénomène avec une forte lunette, j'ai remarqué que, en réalité, les objets ne sont pas agrandis, mais qu'il se produit plusieurs images du même objet, superposées l'une à l'autre, tantôt directes, tantôt renversées. J'en ai compté jusqu'à cinq. Ces images étant, en général, très voisines l'une de l'autre, il est difficile de les séparer à l'œil nu et l'on a ainsi

(Fig. 164.) Mirage supérieur parallèle. Morges 27 juin 1879.

(1) Archives de Genève, XXVII, 358, 1892.

(2) Ce que j'appelle actuellement mirage sur eau froide. J'ai renoncé au mot de mirage d'eau froide que j'employais d'abord, parce qu'il n'est pas assez explicite. F.-A.-F.

l'illusion d'un objet agrandi. Souvent même, elles empiètent l'une sur l'autre, ce qui ajoute encore à cette illusion. Parfois il n'y a qu'une partie de l'objet qui donne naissance à des images multiples. Ainsi il m'est arrivé de voir des barques avec deux coques, les voiles ne présentant rien d'extraordinaire; quelques instants après, il ne restait plus qu'une coque et les voiles avaient pris des proportions gigantesques. Les Fata-morgana me paraissent donc être un mirage à images multiples.



(Fig. 165.) Le château de Chillon vu de Morges, 15 avril 1894. Déformations successives de l'image.

« Ici encore l'analyse mathématique peut expliquer les faits observés. Dans sa notice sur le mirage, Bravais démontre, par des calculs assez compliqués, la possibilité de trois images, dans les cas où une couche d'air chaud vient se superposer plus ou moins brusquement à une couche d'air froid, et lorsque le calme subséquent de l'atmosphère permet à ces deux nappes de subsister quelque temps dans cet état. Telles sont précisément les conditions qui sont remplies pendant l'apparition des Fata-morgana. Cette existence de trois images n'est qu'un cas particulier de Fata-morgana dont Bravais donne ainsi, sans le savoir, une explication mathématique. J'ai essayé d'expliquer de la même manière la production de cinq images, mais j'ai été arrêté par la complication des calculs. La méthode de Bravais montre encore pourquoi, comme dans le cas des barques, certaines parties seulement d'un objet donnent lieu à des images multiples.

« Enfin l'instabilité d'équilibre de couches de densités très différentes et la nécessité d'un calme presque parfait expliquent suffisamment la mobilité du phénomène. Si la différence des températures diminue, nous rentrons dans le cas du mirage ordinaire d'eau froide, et c'est pourquoi les objets nous paraissent avoir des dimensions alternativement très grandes et très petites. »

Cette théorie du savant ingénieur, notre ami, rend fort bien compte, à ce qu'il semble, de tous les cas si variés et si étranges de mirages

superposés en temps de réfractions sur eau froide. Mais s'applique-t-elle au cas plus général de la Fata-morgana, dans laquelle il y a distension en hauteur sans apparence d'images multiples? Je n'ose me prononcer sur ces questions difficiles qui me semblent mériter encore une étude patiente et longuement répétée.

III. **Fréquence relative des divers types de réfraction.**

Les réfractions anormales et les mirages qui les accompagnent sont d'apparition très fréquente. Il est rare qu'en étudiant la nappe du lac et la côte opposée, l'on ne surprenne des indices de l'un ou l'autre type de ces phénomènes. L'absence de déformation du paysage qui s'étend de l'autre côté du lac est exceptionnelle. Je ne veux pas dire que ces apparitions soient toujours évidentes, et qu'elles frappent l'œil d'un observateur non prévenu. Mais pour celui qui connaît les choses du lac, il saura les apercevoir presque constamment.

Les réfractions sur eau froide sont relativement rares. Ce que nous avons dit de la température comparée de l'air et de la surface du lac nous a appris que, dans la plus grande partie de l'année, l'eau est plus chaude que l'air. Cela a lieu pendant toute la journée et la nuit des mois d'automne et d'hiver, pendant la nuit et le matin des jours du printemps et de l'été. Ce n'est que pendant le milieu et la fin de la journée de la saison chaude et du premier automne que la chaleur dépasse celle de l'eau du lac.

De plus, comme nous l'avons vu à propos du mirage sur eau froide, même quand les conditions des réfractions sur eau froide semblent être établies, on voit la persistance du mirage; ce n'est souvent que bien des heures après que l'air a dépassé l'eau dans son réchauffement diurne que, presque subitement, les réfractions sur eau froide apparaissent.

Pendant l'année 1889, j'ai noté fréquemment les types de réfractions à l'heure de midi. Je groupe dans deux séries, d'une part les jours où j'ai inscrit les réfractions sur eau chaude, avec mirages sur eau chaude ou sur eau froide, d'une autre part les jours où le mirage était nul ou bien où apparaissaient les réfractions sur eau froide.

	Mirages	Absence de mirages Réfractions sur eau froide
Mars	5	6
Avril	2	11
Mai	4	15
Juin	9	4
Juillet	9	3
Août	10	5
Septembre	10	3
Octobre	10	5

De novembre à février, l'apparition du mirage est constante.

C'est surtout au printemps, alors que le réchauffement du lac est en retard sur celui de l'air que les réfractions sur eau froide sont fréquentes. A partir de midi ou de 14^h, on voit le mirage disparaître, le lac se creuser, la côte opposée se soulever, les objets masqués par l'horizon émerger au-dessus du lac, les maisons, champs et forêts bas sur l'eau s'aplatir sous l'action des réfractions d'été. Pendant les mois de mars à mai, ces réfractions sur eau froide m'ont apparu plus fréquentes dans mes observations de midi que les réfractions sur eau chaude et les mirages. M. Ch. Dufour a déjà, en 1854, parfaitement caractérisé les conditions d'apparition de ces deux sortes de phénomènes.

En temps de réfractions sur eau chaude, le plan de l'horizon apparent est déprimé; en temps de réfractions sur eau froide, il est soulevé. Quelle est la grandeur extrême de ces mouvements illusoires? Pour l'étudier j'ai, pendant l'année 1890, suivi une méthode d'observation très simple.

J'ai choisi un repère fixe A sur le parapet du pont inférieur de la Morge, près de l'embouchure de la rivière, et un repère mobile B sur le tronc d'un arbre situé dans l'intérieur des terres, à 234.5^m de distance du point A. Etabli au point B, je visais l'horizon apparent et je cherchais le long du tronc de l'arbre la hauteur qui mettait sur la même droite le repère A et l'horizon apparent. Etant donnée la distance entre A et B, tout déplacement vertical de 1^{cm} de mon œil en B correspondait à un angle de $8.9''$.

Il est inutile de donner ici le détail des observations que j'ai faites par ce procédé. Je me bornerai aux valeurs extrêmes :

Le 18 janvier 1891, à 12^h, température de l'air -10° (1), la dépression de l'horizon apparent était très forte et le point de visée en B était à $+16^{cm}$.

Le 12 mai 1890, à 16^h, température de l'air $+23^o$ (2), le soulèvement de l'horizon apparent était le plus fort et le point de visée en B était à -80^{cm}.

La différence de hauteur entre ces deux valeurs extrêmes, 96^{cm}, correspond à 14 minutes de degré

$$(96 \times 8.9'' = 854'' = 14')$$

Si la hauteur du lac avait grandement varié d'une observation à l'autre, j'aurais dû faire intervenir une correction de ce fait. Mais il s'est trouvé, par hasard, que le lac était dans les deux cas tellement à la même hauteur (à 1.5^{cm} près) que cette correction est d'importance nulle.

Je puis donc admettre que, entre la dépression maximale de l'horizon apparent par les réfractions sur eau chaude, et son soulèvement maximal par les réfractions sur eau froide, la différence angulaire n'est que d'environ un quart de degré.

IV. Le mirage latéral.

Pour être complet, je dois citer ici l'observation classique faite par Soret et Jurine en 1817 (3). Elle a été admise par Biot comme un cas authentique de mirage latéral, et depuis lors elle est citée par tous les auteurs comme le seul exemple connu de ce phénomène. Vu son importance historique, je crois devoir la reproduire intégralement en l'accompagnant d'une copie de la figure originale de Jurine réduite au quart (4) (fig. 166, p. 562).

« Le jeudi 17 septembre 1818, à 10^h, le ciel était nuageux, l'air légè-

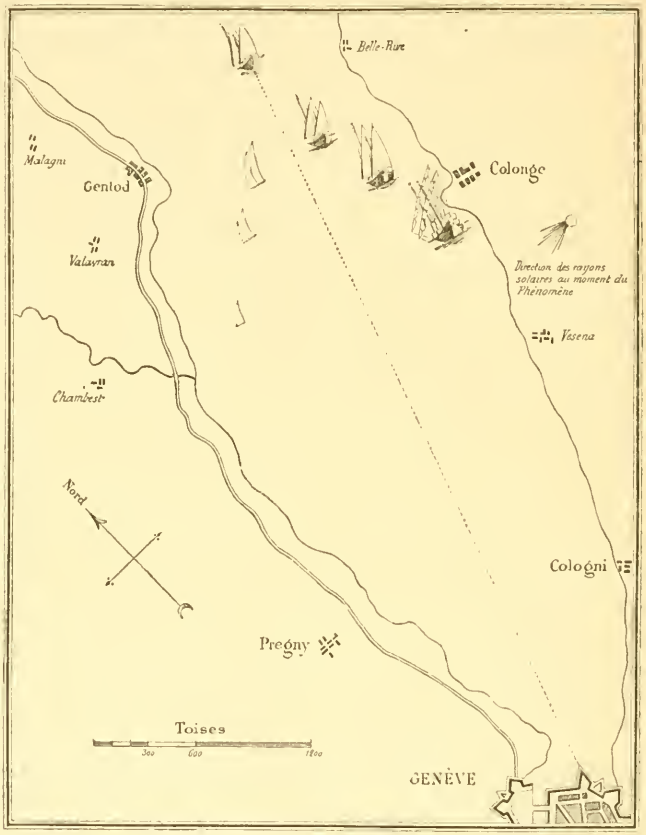
(1) Température de l'eau environ $4^o\ ^1/_2$.

(2) Température du lac à Genève, ce jour-là, 11.0^o.

(3) Bull. soc. philomatique, 1820, p. 28. Paris, 1820.

(4) Cette copie est plus fidèle que celle qui traîne dans tous les manuels de physique et qui est indignement altérée.

rement chargé de vapeurs, et légèrement agité par un vent de nord-est; le thermomètre à 12 $^1/_4$ degrés de Réaumur, et le baromètre à 27 pouces $^3/_{16}$; M. Soret se trouvant chez moi, au deuxième étage d'une maison située au bord du lac, s'amusait à regarder, avec un



(Fig. 166.) Le soi-disant mirage latéral de Soret et Jurine. Genève 17 septembre 1818 (réduction à moitié du croquis de Jurine).

grand télescope, une barque chargée de tonneaux, dont les deux voiles étaient déployées, et qui faisait route pour Genève.

« Au moment où cette barque arriva à la hauteur de la pointe de Bellerive (cap formé par le rétrécissement du lac, à une lieue au-dessus de Genève, et situé sur la rive gauche), elle changea un peu sa direction primitive, en se portant vers la rive gauche. Ce fut dans cet

instant que M. Soret vit paraître au-dessus de l'eau l'image des deux voiles, laquelle, au lieu de suivre la marche de la barque, s'en sépara pour en prendre une différente, en cheminant du côté de la rive droite, dans la direction apparente de l'est à l'ouest, tandis que la barque marchait du nord au sud.

« Au moment de l'observation, la partie du lac où se trouvait la barque paraissait calme, et, comme à l'ordinaire, d'une couleur d'aigue marine, tandis que celle qui était rapprochée de l'observateur était faiblement agitée et d'une teinte grisâtre, due, sans doute, à la réflexion des images.

« Quand l'image se sépara de la barque, ses dimensions étaient égales aux deux voiles qu'elle représentait ; mais à mesure qu'elle s'en sépara, elle diminua insensiblement, de manière à se trouver réduite de moitié lorsque le mirage cessa.

« J'arrivai à temps auprès de M. Soret pour voir ces deux objets à peu de distance l'un de l'autre ; ils s'avançaient toujours sur le même plan, de manière qu'en faisant mouvoir le télescope horizontalement, ils passaient l'un après l'autre dans le champ de l'instrument. Quand les rayons solaires qui perçaient de temps en temps au travers des nuages, se portaient sur l'image, on la distinguait aisément à la vue simple ; observée avec le télescope, elle paraissait d'une blancheur éclatante : mais ce qui nous frappa le plus, fut de ne pas voir cette image renversée, comme cela a lieu dans les mirages ordinaires, et de ne pouvoir distinguer au-dessous d'elle ni le corps du bâtiment, ni les tonneaux dont il était chargé ; les voiles seules étaient reproduites dans la même position qu'elles occupaient sur la barque, et également gonflées.

« Entre le corps palingénésique et la surface plane de l'eau, il semblait exister un intervalle, au-dessus duquel nous vîmes pendant quelques instants se réfléchir assez nettement une partie de l'image de ce corps ; mais dès qu'il eut atteint la surface agitée, cette réflexion cessa et j'observai sur le bord postérieur de la grande voile une ondulation qui paraissait coïncider avec celle des petites vagues environnantes.

« Au bout d'un certain temps, une maison voisine m'ayant masqué la barque, je priai M. Soret de monter au grenier pour continuer l'observation. Quoique son nouveau poste l'eût placé à une élévation plus que double de la mienne, au-dessus de la surface de l'eau, il vit également bien l'image, qui continuait à s'avancer vers la rive droite, à

mesure que la barque se dirigeait vers la gauche : environ dix minutes après son arrivée au grenier, M. Soret descendit pour m'annoncer que les bateliers avaient plié les voiles, de façon à ne plus distinguer au grand mât qu'une seule bande blanche ; avant de connaître le changement, j'avais déjà remarqué que l'image de la petite voile s'était insensiblement dissipée, et que celle de la grande avait diminué de ses dimensions primitives, et j'étais tenté d'attribuer cette modification dans l'apparence du spectre au changement d'horizon, et au rideau que la terre commençait à former derrière lui ; mais je ne tardai pas à reconnaître mon erreur en apprenant ce qui s'était passé sur la barque et en continuant à voir la bande blanche poursuivre sa marche, jusqu'à ce que les arbres des Pâquis, interposés entre elle et nous, l'eussent complètement cachée à nos regards. »

Les physiciens Genevois ont évidemment cru voir un mirage latéral (ce qu'ils appellent un corps palingénésique) ; cette interprétation a été admise d'enthousiasme par Biot quand il a publié la lettre de Jurine dans les bulletins de la Société philomatique. Depuis lors, elle a été répétée par tous les auteurs qui ont copié en l'altérant de mieux en mieux la figure originale, du « seul exemple authentique connu d'un mirage latéral. »

Je ne puis accepter cette attribution. S'il y avait eu mirage latéral, l'image secondaire aurait été ou symétrique ou parallèle à l'image réelle. Or d'après le dessin, elle n'est ni l'une, ni l'autre. Les vergues des deux barques sont à peu près parallèles, mais le reste des voiles ne l'est pas ; le corps de la barque de droite et son chargement sont bien visibles ; ceux de la barque de gauche disparaissent derrière l'horizon apparent.

Mis en présence du dessin de Jurine, tout lecteur non prévenu y verra deux barques, l'une venant vent arrière de Bellerive, dans la direction de Genève, à 3 ou 4^{km} de distance, assez près pour qu'on y distingue les tonneaux qui sont sur le pont ; l'autre traverse d'Hermance à Coppet ou Versoix à quelque 8 ou 10^{km} de distance, assez loin pour que la rotondité de la terre masque en partie le corps du bateau.

Pour juger la question, je me suis installé à Genève à une fenêtre de deuxième étage du Grand-Quai, et j'ai cherché à reconstituer le tableau que voyaient Soret et Jurine. Précisément à ce moment plusieurs barques arrivaient voiles déployées, et deux d'entr'elles avaient exacte-

ment les mêmes positions que celles du 17 septembre 1818. Mais, — était-ce scepticisme de ma part ? — je n'ai pas eu un instant d'illusion, et je n'ai pas douté de la nature réelle des deux images qui se peignaient dans ma rétine.

Je n'ai jamais vu ni de Morges, ni de Genève, ni d'ailleurs, rien qui ressemblât à un mirage latéral. L'observation de Soret et Jurine n'a, à ma connaissance, été répétée jusqu'à présent par personne.

V. VIBRATIONS DE L'AIR

Il est un phénomène fréquent à la surface du lac, où il acquiert des proportions très évidentes ; c'est le même qui gêne si souvent les observations astronomiques et géodésiques. Je le désignerai sous le nom de vibration de l'air.

On voit l'air qui repose sur le lac, chassé par un vent fort ou faible, briser les rayons lumineux en les faisant sautiller, scintiller, tellement que l'œil n'obtient aucune image nette. Ces déformations des images sont analogues à celles qu'on obtient lorsque le rayon visuel rase un corps fortement échauffé, une cheminée de bateau à vapeur, un mur brûlé par le soleil, ou un corps très froid, un bloc de glace, une surface de glacier. Elles sont donc évidemment dues à des réfractions anormales sur des couches d'air différemment denses.

Ces vibrations de l'air à la surface du lac n'occupent qu'une couche peu épaisse ; les masses éclairées qui s'élèvent à un quart de degré, à un demi-degré ou plus au-dessus de la nappe de l'eau en sont parfaitement exemptes, et les arêtes des montagnes de l'autre côté du lac sont aussi nettes et franchement dessinées que jamais, quand les objets à l'horizon sont le plus tourmentés par cette scintillation.

Ces vibrations sont mobiles et se déplacent dans le sens du vent ; on dirait qu'on voit l'air se mouvoir. Je ne suis pas encore arrivé à préciser les conditions de cette apparition. Je l'ai vue par des temps presque calmes, je l'ai vue par des bises violentes ; je l'ai notée en plein hiver lors des réfractions d'air froid et des mirages les plus évidents ; je l'ai observée au printemps, un jour que la Fata-brumosa me prouvait l'existence des réfractions d'air chaud. D'une autre part, elle n'est pas toujours évidente, et par des vents violents je n'ai pas su en trouver traces.

VI. ILLUSION DE GRANDEUR DES OBJETS FLOTTANTS SUR L'EAU

Les deux types de réfractions que nous avons montrés aboutissant à des résultats opposés pour la position et l'apparence des objets vus à l'horizon, occasionnent de singulières illusions dans l'appréciation de la grandeur d'objets flottants sur l'eau.

Par les réfractions d'été, un bateau qui navigue à quelques kilomètres de distance nous paraît extraordinairement petit ; par les réfractions d'hiver, le même bateau, à la même distance, nous semble extraordinairement grand.

Ces illusions proviennent de l'action de la réfraction sur la courbure apparente de la nappe lacustre.

Quand en hiver règnent les réfractions d'eau chaude, le cercle de l'horizon est rapproché de nous, et la barque qui passe au large à 2 ou 4km nous apparaît au-delà du cercle de l'horizon ; nous la voyons soulevée par le mirage, nous l'estimons à une grande distance, et comme elle sous-tend un angle assez fort, nous la jugeons être de grande taille.

Quand, au contraire, ce sont les réfractions d'eau froide qui règnent, quand, en été, la nappe du lac nous semble concave, la même barque nous apparaît au-devant, en deçà du cercle de l'horizon ; nous voyons le plan de l'horizon la dominer derrière elle, et nous nous figurons qu'elle est fort rapprochée de nous, plus rapprochée qu'elle n'est en réalité. L'angle visuel sous lequel nous la voyons, est celui qui correspond à sa distance réelle ; mais comme nous faisons une fausse appréciation de la distance, comme nous faisons une erreur en moins sur l'évaluation de l'éloignement, nous en concluons à une taille, à des dimensions trop petites.

Après 40 ans d'observations journalières sur le lac, et possédant, je puis le croire, une connaissance suffisante des choses lacustres, je suis encore chaque fois victime de cette illusion, et je dois me corriger par le raisonnement pour arriver à une saine appréciation de la distance et de la grandeur des objets flottants sur l'eau.

Veut-on se rendre compte de l'importance que peut prendre une telle illusion ? Que par un jour d'hiver, par une brise légère, alors que le mirage sur eau chaude rapproche déjà notablement le cercle de l'horizon, on abaisse son rayon visuel jusqu'au niveau même de l'eau en le faisant réfléchir sur un miroir incliné à 45°. Les brindilles de bois

et les feuilles mortes qui flottent sur le lac à quelques mètres de nous paraîtront sur la crête de l'horizon, et nous les prendrons pour des poutres énormes ou de gigantesques ballots, agités par de grosses vagues à quelques kilomètres de distance. Comme le disait le fabuliste :

« Ce sont bâtons flottant sur l'onde. »

VII. LA GRANDEUR APPARENTE DES MONTAGNES DE LA CÔTE OPPOSÉE

Dans l'hiver de 1887-88, j'ai été frappé d'un fait qui n'avait pas encore à ma connaissance, été signalé. Les montagnes de la Savoie et des Alpes vaudoises qui, vues de Morges, déploient leur splendide amphithéâtre de l'autre côté du lac, me paraissent plus hautes en hiver qu'en été. J'ai vérifié cette impression depuis lors, et je la confirme avec certitude. Une telle observation ne peut être faite que sur un paysage bien connu, assez attrayant, assez intéressant pour appeler fréquemment le regard. Je ne sache pas qu'elle ait été répétée ailleurs.

En revanche, il est une observation qui a été faite partout et souvent, c'est la différence considérable que nous faisons dans l'évaluation de la distance de la côte opposée et des montagnes qui la surmontent, suivant le degré de limpidité de l'air. Cette différence d'appréciation de la distance ne se traduit jamais en différence d'appréciation de la hauteur et c'est là une anomalie que nous devons tout d'abord discuter.

Quand l'atmosphère est transparente, quand notre vallée est remplie de cet air privé de poussières, parce qu'il a été lavé par la pluie, ou chez nous ou dans les pays qu'il a traversés auparavant, comme l'a fort bien expliqué J.-L. Soret [1], quand les forêts et les rochers des Alpes m'apparaissent nets, distincts, fortement ombrés, à contours tranchés et durs, j'ai l'impression que les montagnes sont rapprochées ; quand, au contraire, la brume aérienne, le *haze* des Anglais, atténue les reliefs, adoucit les tons et étend son voile de gaze sur les monts de la côte opposée, j'ai l'impression que ceux-ci sont éloignés. L'évaluation imaginaire de la distance d'un même point peut varier ainsi, peut-être, du simple au double. Mais je ne pense jamais à dire que la hauteur des montagnes me semble varier en même temps, que dans le

[1] Archives de Genève, XI, 102, 324, 1884.

premier cas les montagnes me paraissent peu élevées, que dans le deuxième cas elles me paraissent énormes. Et cependant l'angle visuel restant le même, du moment que je fais des appréciations différentes de leur distance, il semblerait que je devrais les traduire en appréciations différentes de leur hauteur réelle.

Et je ne suis pas le seul à avoir cette impression. Jamais je n'ai entendu personne parler de variations dans l'appréciation de la grandeur des montagnes suivant la limpidité de l'air : tous les observateurs que j'ai consultés sur ce point sont d'accord avec moi pour ne penser en pareil cas qu'à des variations dans l'appréciation de la distance.

Il faut expliquer cette anomalie. Tandis que, dans la vie journalière, nous traduisons normalement, en appréciation de la grandeur, l'angle visuel d'un objet combiné avec sa distance apparente, il est étrange, en effet, que dans ce cas spécial, nous ne nous occupions que de l'appréciation de la distance et point du tout de celle de la grandeur. Voici l'interprétation que j'en propose :

Ce ne serait que pour les objets rapprochés, de dimensions commensurables avec les corps qui nous entourent, que nous utiliserions instinctivement le procédé géométrique qui nous fait construire mentalement le triangle rectangle dont nous connaissons un angle et un côté, et dont nous pouvons calculer l'autre côté. Pour les objets de grande taille ou très éloignés, pour les montagnes, nous en évaluons la grandeur par un autre procédé; nous en étudions la végétation arborescente ou herbacée, nous cherchons si leur sommet est enneigé par les frimas de l'hiver, ou s'il est revêtu du manteau des glaces éternelles. Bref, pour l'appréciation de la hauteur d'une montagne, nous mettons en jeu l'observation du naturaliste plutôt que la trigonométrie du mathématicien.

Cela étant, si la montagne nous semble près ou si elle nous semble loin, c'est ce point seul qui nous attire. Nous ne nous occupons pas de la question de hauteur; nous ne nous attachons qu'à la distance : nous ne faisons pas pour la montagne la construction géométrique qui nous intéresse immédiatement quand nous regardons un homme, un arbre ou une maison ; et quoique la question de hauteur soit pour une montagne la première qui se présente à notre esprit, nous la réservons à une autre étude pour laquelle les variations de la distance n'ont rien à faire.

Serait-ce à un raisonnement instinctif de cet ordre que nous pourrions attribuer la différence de hauteur apparente que je constate chez les montagnes de la côte opposée à Morges, suivant que je les regarde en été ou en hiver? En été, les premières chaînes du grand cirque des Alpes sont dégarnies de neige; seules, quelques cîmes, le Mont-Blanc, le Weisshorn, les Diablerets, l'Oldenhorn gardent leur linceul des glaces qui ne fondent jamais; aucun doute n'est possible sur le peu de hauteur relative des Alpes antérieures, des Préalpes qui bordent le lac [1]. En hiver, au contraire, leur parure de neige leur donne un air de grandes Alpes, et un spectateur novice leur attribuerait facilement des altitudes tout-à-fait abusives.

Si j'étais un touriste étranger contemplant pour la première fois ces paysages, je pourrais être trompé par le spectacle, et mon erreur suffirait à expliquer l'illusion de grandeur qui nous occupe. Mais tel n'est pas le cas. Le paysage m'est assez familier pour que chaque détail en soit buriné dans ma mémoire. Dès ma première enfance, je l'ai contemplé et admiré sous tous ses aspects, par tous les temps, dans toutes les saisons; je l'ai souvent dessiné et je puis dire que ses moindres accidents sont fidèlement inscrits dans mon œil. Je connais la hauteur relative de chaque cime, et si j'en vois une enneigée par une giboulée locale d'un hiver trop hâtif, je ne pense aucunement à attribuer à cette montagne une hauteur excessive; je traduis cette anomalie du tableau en y cherchant une anomalie des faits météorologiques.

Je ne me trompe donc pas en écartant cette interprétation du phénomène.

[1] Cependant! Voici ce qu'on raconte, au coin du feu, à Morges. Feu A. B. promenait sur les quais un sien ami venu de France. Le Mont-Blanc resplendissait dans l'encadrement majestueux que l'érosion de la Drance du Chablais lui a découpé entre le Billiat et l'Ouzon. Tous deux l'admiraient. — « Mais » s'écria le Parisien « vous m'en contez belle avec votre Mont-Blanc. Je sais bien qu'il est la plus haute montagne d'Europe, et cette cime-là est bien plus élevée que votre prétendu Mont-Blanc. » (En effet, la Dent d'Oche qu'il montrait, avec ses 2225^{m}, distante de Morges de 25^{km} sous-tend au-dessus du lac un angle de 4°13′, tandis que le Mont-Blanc, haut de 4810^{m}, mais distant de 80^{km}, n'apparaît que sous un angle de 3°8′.) — « Mais ne voyez-vous pas, répondait A. B., que cette Dent d'Oche est plus rapprochée de nous, et qu'elle ne porte pas de neiges. » — « Vous êtes un farceur. J'ai des yeux et je vois que votre soi-disant Dent d'Oche est plus haute que votre prétendu Mont-Blanc... » Et les deux amis se regardèrent longtemps de travers. Chacun se demandait si son interlocuteur n'avait pas, par hasard, voulu le mystifier. Et, dit-on, ils se séparèrent sans que cette question préjudicielle eût été résolue.

J'avais pensé à faire intervenir, comme explication, l'illusion de grossissement que nous avons décrite à propos des objets flottants sur l'onde. Je doute cependant de la justesse d'un tel rapprochement, car la distance des montagnes est pour nous bien connue, et nous ne faisons aucune erreur sur leur éloignement. Les seules illusions que nous subissions à leur égard sont celles qui sont causées par la plus ou moins grande limpidité de l'air ; et encore ne sont-ce pas de véritables illusions ; elles n'amènent jamais une erreur dans notre appréciation.

J'attribue simplement la différence d'impression de hauteur que me font les mêmes montagnes de la côte opposée aux réfractions différentes de l'été à l'hiver.

Pendant l'hiver, ce sont les réfractions d'eau chaude qui règnent presque en permanence ; l'horizon apparent est abaissé et le rideau formé par la côte opposée en est d'autant surélevé. Pendant l'été, au contraire, nous avons généralement les réfractions d'eau froide ; le plan de l'horizon est soulevé, le lac paraît concave, et le bas de la côte opposée étant relevé sans que le sommet de la montagne le soit dans les mêmes proportions, la montagne semble diminuée en hauteur.

Ce n'est pas très apparent pour les hautes montagnes qui sous-tendent des angles de 3 à 4 degrés ; les quelques minutes de degré qu'ajoutent ou que retranchent les réfractions opposées ne représentent qu'une fraction minime de la grandeur totale. Mais sur des terres basses, comme l'est pour le Morgien la côte de Savoie qui s'étend de Coudrée à Yvoire, et forme comme un cap de un demi degré à peine de hauteur, il en est autrement. Suivant que les réfractions d'hiver en augmentent l'épaisseur, ou que les réfractions d'été l'aplatissent, la différence est proportionnellement assez forte, nous avons vu qu'elle peut être de $^1/_4$ de degré, pour que je puisse la constater sans hésitation et confirmer sur ce point la justesse de mon explication.

La variation de hauteur des eaux du lac contribue aussi à cette illusion. En été, le lac est plus élevé qu'en hiver, et quand je stationne sur le même quai, mon œil est, au temps des hautes eaux, plus rapproché de la nappe aqueuse. Le cercle de l'horizon est alors, indépendamment de toute réfraction, plus rapproché de moi, et la tangente à ce cercle atteint la côte opposée en un point plus élevé ; je vois de cette côte une moindre hauteur en été qu'en hiver. Le calcul me montre que cette action est peu importante. Pour une différence de hauteur d'un mètre d'eau, à 30^{km} de distance, suivant que mon œil est à 2^m ou à 3^m

au-dessus du lac, la hauteur de la côte masquée en plus ou en moins n'est que de 4.3^m, ce qui donne une différence angulaire plus faible qu'une minute de degré. Cette action est donc bien plus faible que celle des réfractions, mais comme elle agit dans le même sens qu'elles, elle doit s'additionner à leur effet, et aider au phénomène, peu apparent du reste, que je signale.

Je conclus. La grandeur apparente des montagnes de la côte opposée est plus grande en hiver qu'en été. Cette différence est due essentiellement aux réfractions des rayons lumineux à la surface de l'eau ; accessoirement à la différence de hauteur d'eau dans les diverses saisons.

NEUVIÈME PARTIE

ACOUSTIQUE

Vitesse de la transmission du son dans l'eau.

La question de la propagation du son dans l'eau douce a été étudiée expérimentalement, pour la première fois, dans le lac Léman, par Daniel Colladon, de Genève, en 1826, à l'occasion des recherches sur la compression des liquides que ce physicien faisait en collaboration avec Ch. Sturm (1). Voici comment l'expérience fut instituée. Deux bateaux étaient ancrés à 200^{m} de la rive, l'un devant Rolle, l'autre devant Thonon, séparés l'un de l'autre par une distance de 13487^{m}. A l'un de ces bateaux était suspendue, à 1.5^{m} de profondeur sous l'eau, une cloche de bronze pesant 65^{kg} ; un marteau était articulé de manière à frapper la cloche et à produire ainsi un son net et unique. En même temps une lance à feu fixée au manche du marteau allumait une masse de poudre et déterminait un éclair qui coïncidait exactement à l'instant du coup sur la cloche. Dans l'autre station le bateau portait un cornet acoustique consistant en un tube en fer-blanc de 5^{m} de long terminé par un pavillon ovalaire de 20^{dm^2}, fermé lui-même par une feuille de fer-blanc verticale. Ce tube plein d'air s'appliquait, par

(1) Mémoire sur la compression des liquides par MM. *D. Colladon* et *C. Sturm*. Mémoires des savants étrangers à l'Académie des sciences de Paris. Tome V. Paris, 1837, p. 63 sq.

son extrémité supérieure terminée en pointe, dans l'oreille de l'observateur, la plaque verticale du pavillon étant dirigée dans la direction d'où devait venir le son, et le bruit de la cloche frappée à distance parvenait avec une netteté extraordinaire à l'oreille.

L'expérience se faisait de nuit, de telle manière que l'observateur muni du cornet acoustique pût voir la lueur de l'éclair (la courbure de la terre ne lui permettait pas de voir la flamme même de la poudre en combustion), il notait l'instant de l'explosion coïncidant avec l'instant de la production du son, et notait l'instant de la perception du son en moyenne 9.4 secondes après. D'après ces expériences, la vitesse de la transmission dans l'eau est de 1435 mètres par seconde, vitesse à peu près 4 fois plus rapide que celle du son dans l'air qui n'est que de 341^{m}.

Une seconde série d'expériences [1] a été faite par la même méthode en août 1841 par D. Colladon, assisté par Müller, professeur à Nyon, entre Promenthoux et Grandvaux, près Cully, et même entre Promenthoux et Chillon. Ces expériences n'ont pu servir à déterminer la vitesse de la transmission dans l'eau, les observateurs n'étant pas arrivés à apercevoir la lueur produite par la combustion d'une livre de poudre brûlée à chaque essai ; mais la perception très nette du coup à 36 et 51^{km} de distance montre l'excellence de la propagation du son dans l'eau.

Colladon a fait à cette occasion une foule d'observations très intéressantes qui montrent entr'autres, à l'aide d'un cornet hydro-acoustique, que les vibrations peuvent persister assez longtemps dans l'eau, que l'on peut reconnaître le timbre des bruits, distinguer par exemple le bruit des chaînes d'une barque dont on lève les ancres à 3 ou 4^{km} de distance, que malgré l'interposition d'un promontoire, le son peut encore très bien être perçu dans l'eau, etc., etc.

Transmission du son dans l'air à la surface du lac.

L'audibilité des ondes sonores à distance est très variable d'un jour à l'autre ; c'est ce que chacun a pu constater. Ces différences ne s'étudient nulle part mieux qu'à la surface d'une nappe d'eau où aucun obstacle solide ne s'oppose à la propagation du son.

[1] *Dan. Colladon.* Expériences relatives à la production et à la transmission du son dans l'eau. Bibliothèque universelle de Genève, août 1841.

Parfois les sons s'entendent de fort loin ; parfois l'atmosphère est comme sourde, et l'oreille ne perçoit aucun bruit. Dans les mêmes conditions apparentes de grand calme de l'air, nous entendons de Morges chaque roulement d'un tambour qu'on frappe à Thonon, à 14km de distance, nous sommes étonnés par les coups de palettes des roues d'un pyroscaphe, qui traverse le lac d'Evian à Ouchy à 8km d'éloignement, ou nous sommes réjouis par le caquet des lavandières qui s'ébattent en lavant leur linge sur la côte de Préverenges à 2500m de nous : — ou bien nous n'entendons rien, le bateau à vapeur qui passe à quelque cent mètres est comme muet, et si nous sommes à un kilomètre ou deux en plein lac, les cloches qui sonnent à toute volée sont à peine perçues.

Les conditions qui peuvent faciliter la propagation du son dans l'air ou y mettre obstacle sont nombreuses : agitation de l'air, brouillards et nuages, stratification de l'air suivant son humidité ou sa chaleur, inégale distribution de la chaleur et de l'humidité.

Je n'ose pas essayer de discuter les observations personnelles assez nombreuses que je possède sur ce sujet ; elles sont encore trop mal ordonnées pour que je puisse espérer en tirer rien d'utile. Quant à la théorie de ces phénomènes de transparence et d'opacité sonore, elle se trouve dans les manuels et traités spéciaux ; j'y renvoie le lecteur.

DIXIÈME PARTIE

CHIMIE

Dans cette partie de notre livre nous étudierons successivement :
La composition chimique des eaux du Léman.
La densité des eaux du lac.
Les eaux lacustres considérées comme eau d'alimentation.
L'odeur des eaux du lac.

I. COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN

1. **Documents originaux.**

Nous possédons un assez grand nombre d'analyses chimiques des eaux du lac Léman, faites à différentes époques et par différents auteurs. Je commencerai par réunir les documents originaux qui serviront de base à notre discussion. (1)

Toutes les valeurs et tous les résultats d'analyses, que je donnerai dans ces chapitres, sont rapportés au poids de un kilogramme ou au volume de un litre d'eau.

(1) Quoique les anciennes analyses ne soient guère comparables aux analyses modernes, vu les grandes différences de méthode, nous les donnons ici à titre de documents historiques, certainement intéressants pour plusieurs de nos lecteurs.

Nos *1* et *2*. *Analyse de Tingry*, pharmacien et professeur à Genève, en 1808. Les valeurs sont données en pouces du pied de roi, en grains de la livre poids de marc, et en degrés de l'échelle Reaumur. (1)

Pour faciliter les comparaisons, je mets en regard les proportions trouvées par Tingry, transformées en milligrammes par litre.

	CHIFFRES ORIGINAUX		SYSTÈME MÉTRIQUE	
	Dans 50 livres, poids de Marc.		Dans 1 litre d'eau.	
	1 février 1808	5 août 1808	1 février	5 août
	N° 1	N° 2	N° 1	N° 2
Température de l'eau	11°R	18°R	13.7°C	22.5°C
Température de l'air extérieur	7°	16.6°	8.7°	20.7°
Gaz dénué d'acide carbonique	16.5 pouces	19.5 pouces	13.45 cm3	15.89 cm3
Partie extractive, résineuse	3.5 grains	3. grains	8.25 mg	7.5 mg
Carbonate de chaux	28.	37.5	61.6	82.5
Carbonate de magnésie	3. —	3.5 —	7.5	8.2
Muriate de magnésie	3.5 —	4.5 —	8.2	9.9
Sulfate de chaux	19.	13.5 —	41.8	29.7
Sulfate de magnésie	16. —	16. —	35.2	35.2
Argile siliceuse	1. —	0.5 —	2.2	1.1
Total des produits, sans les gaz,				
de 50 livres d'eau	1 gros 2 gr.	1 gros 6.5 gr.		
de 2 livres d'eau	2 grains	3 grains	160.4	170.1

N° *3*. *Analyse de H. Sainte Claire Deville*, faite sur de l'eau puisée près de la machine hydraulique de Genève le 30 avril 1846 (2), par un beau temps.

Température de l'eau	8.7°
Gaz en volumes.	
Oxygène	8.4cm3
Azote	18.4
Acide carbonique	8.0
Sels dissous.	
Acide silicique	23.8mg
Alumine	3.9
Peroxyde de fer	—
Carbonate de calcium	78.9
Carbonate de magnésium	4.9
Chlorure de sodium	1.7
Report	113.2mg

(1) Bibliothèque de Genève N. D., n° 178.

(2) Annales de Chimie et Physique, XXIII, 40. Paris, 1848.

A reporter	113.2 mg
Sulfate de sodium	7.4
— de calcium	46.6
— de magnésie	6.3
Azotate de potassium	4.0
Azotate de sodium	4.5
Résidu fixe	182.0 mg

Nos *4* à *4c*. *Analyses de M. L. Michaud.*

No *4*. Eau du lac, en dehors du port de Genève, (1) 25 février 1854.

Gaz dissous.	
Oxygène	9.0 cm³
Azote	19.5
Acide carbonique	9.7
Résidu fixe.	
Chaux	45.5 mg
Magnésie	2.6
Soude	3.2
Potasse	traces
Alumine	3.8
Fer	traces
Acide carbonique combiné	50.7
Acide sulfurique	43.0
Chlore	1.5
Silice	23.8
Acide azotique	8.4
Pertes	0.2
	182.7 mg

Nos *4a* à *4c*. Du même auteur, nous avons les analyses partielles suivantes :

			Résidu total.
No *4a*	eaux de Genève,	date inconnue (2)	176 mg
4b	id.	mars 1884 (3)	174.5
4c	id.	id. (3)	176.0

(1) *H.-J. Gosse.* Rapport sur les eaux de l'Arve, Genève, 1881, p. 23.

(2) Cité par le journal *La Tribune de Genève*, 7 mars 1884.

(3) Cité par le journal *le Genevois*, 19 mars 1884.

N° 5. *Analyse du professeur G. Ville*, de Paris. Date inconnue, avant 1870 ; communiquée par le professeur Ch. de Marignac.

Acide carbonique des bicarbonates	9.4 mg
— des carbonates neutres	34.1
Chlore	2.4
Acide sulfurique	39.0
Acide nitrique	14.0
Silice	3.4
Alumine et oxyde de fer	3.6
Chaux	63.8
Magnésie	10.7
Potasse	2.8
Soude	1.2
Ammoniaque	0.2
Azote des matières organiques	0.2
Total	184.8
Résidu obtenu par évaporation	186.4

N° 6. *Analyse de MM. E. Risler et J. Walter.* Eau recueillie le 18 septembre 1872 devant Nyon, en plein lac. (1)

Gaz.	
Acide carbonique	2.88 cm³
Oxygène	6.80
Azote	11.87
Substances dissoutes.	
Silice	1.6 mg
Phosphate de fer	1.1
Chaux	60.5
Magnésie	4.7
Soude	5.2
Potasse	1.9
Acide sulfurique	34.6
Chlore	0.6
Acide carbonique	59.0
Matières organiques (traces) et pertes	0.8
	170.0 mg

(1) Bull. S. V. S. N. XII, 175. Lausanne, 1874.

Nos 7 à *11*. *Analyses de M. L. Lossier*, de Genève, sur de l'eau du lac et du Rhône, en 1877 (1). Les prises d'eau ont eu lieu :

No 7. Eau puisée à la Machine hydraulique de Genève, le 30 janvier.

No *8*. Eau prise à la jetée du port de Genève, le 21 avril.

No *9*. Eau prise au même endroit, le 31 mai.

No *10*. Eau puisée à la Machine hydraulique, le même jour.

No *11*. Eau puisée dans le Rhône à sa jonction avec l'Arve, le même jour.

Les circonstances extérieures de ces prises d'eau ont été les suivantes :

	No 7.	No 8.	No 9.	No 10.	No 11.
Température de l'air	3.8°	7.2°	20.5°	20.5°	20.5°
— de l'eau	6.6°	9.7°	9.5°	10°	10.5°
Hauteur du lac : ZL +	1.35m	1.45m	1.84m	1.84m	1.84m

La composition chimique de ces eaux était :

à 15° et 760mm Gaz dissous, en volumes	7 cm3	8 cm3	9 cm3	10 cm3	11 cm3
Oxygène	10.38	9.50	4.98	5.62	3.83
Azote	17.16	17.35	13,71	13.67	14.81
Ac. carbonique libre	4.61	9.90	12.51	12.06	14.42
	32.15	36.75	31.20	31.35	33.06
Substances solides, en dissolution.	mg	mg	mg	mg	mg
Chlorures de sodium et de potassium.	2.299	1.813	1.731	1.895	2.222
Sulfate de sodium.	13.723	4.763	21.613	24.721	31.297
Sulfate de calcium.	51.238	59.411	42.398	41.697	31.312
Nitrate de calcium.	0.548	2.449	0.698	0.364	0.273
Carbte de calcium.	66.102	64.108	83.757	84.833	90.015
Carbte magnesium .	19.674	22.474	23.421	22.701	20.206
Silice	4.000	3.900	1.800	2.200	1.200
Matières organiques	14.929	14.530	7.462	8.658	11.196
TOTAL . . .	172 513	173.448	182.880	187.069	187.721
Résidu pesé . . .	168.8	167.6	179.7	183.7	184.2

(1) Arch. Genève LXII, 220 et I, 191. Genève 1878 et 1879.

Les chiffres ci-dessus de Lossier sont calculés d'après les résultats d'analyses que voici :

	7	8	9	10	11
Silice	4.0 mg	3.9 mg	1.8 mg	2.2 mg	1.2 mg
Chaux	58.4	61.2	64.6	64.8	63.4
Magnésie	9.369	10.702	13.153	10.810	9.622
Soude et potasse .	7.211	3.041	10.354	11.798	14.840
Acide sulfurique .	37.871	37.631	37.416	38.455	36.051
Chlore	1.395	1.10	1.05	1.15	1.35
Ac. nitrique et nitreux	0.361	1.613	0.460	0.240	0.180
» carbonique combiné	78.806	80.064	98.242	98.234	100.390
» » libre.	8.597	18.468	23.336	22.500	26.900
Matières organiques	14.92	14.53	7.462	8.658	11.196
Ammoniaque. . .	0.065	0	0	traces	0.019
Résidu pesé . . .	168.8	167.6	179.7	183.7	184.2
Degré hydrotimétrique . .	17.5	19.	19.	19.5	19.5
» de l'eau débarrassée d'acide carbonique . .	13.5	14.5	14.5	15.	15.

N° *12. Analyse R. Brandenburg,* 26 juillet 1877 (1). Eaux de la région profonde puisée par F.-A. Forel à 250m devant Ouchy.

Gaz.	Centimètres cubes par litre à 0° et 760mm
Oxygène	2.3
Azote	7.7
Acide carbonique	20.6

Substances dissoutes, en milligrammes par litre.

SiO^2	8.51	SiO^2	8.5
Fe^2O^3 Al^2O^3	0.75	Al^2O^3	0.8
CaO	58.95	Ca	42.1
MgO	5.64	Mg.	3.4
Na^2O	5.15	Na	3.8
K^2O	0.92	SO^4 (*sic*)	40.4
SO^3	33.64	Cl.	0.8
Cl.	0.79	CO^2	51.2
CO^2	37.51	NO^3 (*sic*)	0.0
Mat. organiq. et pertes	13.80	CO^2 libre	20.6cm³
TOTAL	165.66		

(1) Bull. S. V. S. N., XVI, 153. Lausanne, 1880.

Nos 13 à 17. Analyses de MM. Duparc et Delebecque.

No 13. Analyse Duparc. Eau du Grand-lac puisée devant Morges en décembre 1888. Analyse de M. L. Duparc, professeur à l'Université de Genève. (1)

No 14. Analyse Freundler. Eau puisée entre les jetées du port de Genève le 18 mars 1891. Analyse de M. P. Freundler, étudiant à la faculté des Sciences, laboratoire de M. Duparc. (2)

	No 13	No 14
$Si.\ O^2$	4.8 mg	4.2 mg
$Al^2\ Fe^2\ O^3$	0.5	traces
CaO	64.1	65.8
MgO	10.6	11.4
SO^3	38.3	36.2
Cl	1.2	1.1
$NO^3\ H$	0.7	traces
$K^2\ O$	—	1.8
$Na^2\ O$	? (2)	2.7
résidu fixe à 110°	177.5	177.8

Faites dans le même laboratoire et avec les mêmes méthodes, je puis donner encore les analyses suivantes, qui me sont directement communiquées par les auteurs :

No 15. L. Duparc. Eau puisée à 310m de profondeur sur la plaine centrale du lac par M. A. Delebecque, le 22 janvier 1892. Résidu total à 110°, 175.9mg.

No 16. A. Delebecque. Eau de surface puisée à 200m au large de Thonon, le 2 novembre 1893. Résidu total à 110° : 162mg.

No 17. A. Delebecque. Eau de surface prise au large de Thonon, le 25 novembre 1893. Résidu total à 110° : 166mg.

Nos 18 à 22. Analyses de Ch. de Marignac (3). Eau prise dans les conduites d'alimentation de la ville de Genève. Le résidu d'évaporation a été séché à 160°.

(1) Archives de Genève XXXI, 81, 1894.

(2) La soude a été dosée, mais la note s'y rapportant a été égarée.

(3) *Ch. de Marignac.* Proportion de matière organique contenue dans l'eau du Rhône. Mém. de la Soc. de phys. de Genève, t. XXIX, 1re partie, 2e mémoire, p. 41. Genève 1884-1885.

N° *18.*	15 mars 1882	résidu total	170 mg
19.	5 avril —		168
20.	8 — —		167
21.	10 — — très forte bise, eau trouble.		174
22.	5 — 1884		175

N^os^ *23 à 33. Analyses de MM. Chuard et Jaccard* (1). L'eau du lac puisée devant Ouchy a été analysée par M. E. Chuard, professeur à l'Université de Lausanne et M. Marius Jaccard, son assistant.

Les conditions de la prise des eaux ont été :

N°s 23.	27 février 1893, à 2 km au large d'Ouchy,	surface
24.	6 mars — — — —	—
25.	21 avril — 4 km — —	—
26.	— — — — — de Cour,(2)	—
27.	— — — — — de l'Abordage,(3)	—
28.	20 janvier 1894, port d'Ouchy,	—
29.	— — — à 1 km au large d'Ouchy,	—
30.	— — — — — —	2m
31.	— — — 4 km — de Cour,	5
32.	— — — 1 1/2 km — —	2
33.	— — — — — —	7

Les résultats des analyses ont été :

N^os^	Residu solide à 105°	Residu fixe calciné	Matières organiques Par différence	Sulfates Chlorure	Acide nitreux	Acide nitrique	Ammoniaque	OXYDABILITÉ Permanganate de potassium (4)
23	192.5	137.5	55	normal	traces	traces	0.4	6.3
24	197.5	138.0	59	»	»	—	0.5	6.9
25	189.0	139.0	50	»	»	traces	0.4	6.1
26	188.5	138.0	51	»	0	»	0.5	7.7
27	187.5	136.5	51	»	0	»	0.4	6.4
28	174	128.	46	—	1.5	—	0.4	2.3
29	218	173	45	—	1.0	—	0.4	1.7
30	169	124	45	—	2.5	—	0.4	1.7
31	166	120	46	—	2.0	—	0.4	1.4
32	174	136	38	—	2.0	—	0.5	3.4
33	210	153	57	—	2.0	—	0.4	1.7

(1) Inédites.

(2) A l'ouest d'Ouchy.

(3) A l'est d'Ouchy.

(4) Quantité de permanganate de potassium qui, par oxydation des matières organiques, décolore la solution en dix minutes ; en parties de permanganate pour 100 000 parties d'eau.

MM. Chuard et Jaccard ont de plus eu l'obligeance de faire des analyses partielles de l'eau du Léman que j'avais puisée le même jour, le 24 mai 1894, dans différentes régions du Léman. Les lieux de prise ont été les suivants :

		Heure	Température	Couleur en nos de la gamme Forel
Nos 34.	devant Genthod,	9h15	14.6°	—
35.	devant Crans,	9.45	13.6	III-IV
36.	entre Nyon et Yvoire,	10.10	14.2	III-IV
37.	grande Conche,	10.35	14.6	III-IV
37.	entre Evian et Ouchy,	11.35	15.4	III-IV
39.	devant St-Saphorin,	16.15	15.7 (1)	IV
40.	devant Chillon,	15.25	17.9	V
41.	golfe du Bouveret,	15.00	16.8	V

MM. Chuard et Jaccard y ont dosé le résidu total, le résidu fixe calciné, le résidu fixe après saturation par le carbonate d'ammoniaque. La différence entre le résidu total et le résidu calciné puis carbonaté, leur a donné la teneur en matières organiques.

	Résidu solide	Résidu fixe calciné	Résidu fixe calciné et carbonaté	Matières organiques
Nos 34.	187 mg	144 mg	163 mg	24 mg
35.	183	143	151	32
36.	184	132	154	30
37.	177	160	162	15
38.	182	150	157	25
39.	176	170	172	4
40.	188	150	158	30
41.	182	139	155	27

Nos 42 à 46. Analyses partielles de M. H. De Crousaz. La direction de la Compagnie générale de navigation sur le Léman a fait puiser le même jour, à la même heure, le 24 novembre 1892, à midi, cinq échantillons d'eau de la surface dans diverses régions du lac. M. H. De Crou-

(1) L'on voit très nettement ici l'action des eaux troubles sur la température de la surface du lac, dont j'ai parlé page 318. La veille de la prise il y avait eu des pluies violentes qui avaient gonflé les affluents, et ceux-ci avaient déversé dans le lac des grandes masses d'eau trouble qui en salissait la couche de surface. Le 24 mai, un soleil brillant réchauffait puissamment le lac. Cet effet était surtout évident dans les mesures thermométriques faites devant St-Saphorin, Chillon et Bouveret où les eaux étaient louchies par l'alluvion impalpable et arrêtaient dans la couche de surface les rayons du soleil.

saz, pharmacien en chef à l'Hôpital cantonal de Lausanne y a dosé le résidu total et les sulfates.

	Lieu de la prise	Résidu total	Sulfate de chaux
Nos 42.	Traversée de Bouveret à Villeneuve,	230 mg	65 mg
43.	— d'Ouchy à Evian,	200	63
44.	Pointe de Fontanettes (Chanivaz),	170	65
45.	Traversée de Céligny à Nyon,	160	68
46.	— d'Anière à Hermance,	170	71

N 47. Analyses de MM. Seiler et Heuss. M. le Dr F. Seiler, chimiste cantonal à Lausanne et M. Robert Heuss, son assistant, ont étudié, en 1894, les eaux du Léman devant Ouchy. Les prises d'eau ont été faites dans toutes les saisons de l'année; les localités de prise ont été variées, depuis la rive jusqu'à 300m en avant; les eaux ont été puisées soit à la surface soit dans les couches allant jusqu'à 27m de profondeur. M. Seiler publiera prochainement les résultats détaillés de ses analyses et tirera de leur comparaison des conclusions intéressantes. En attendant, il m'a autorisé à indiquer ici les résultats des 27 analyses dont il m'a communiqué les chiffres. Je les résume en donnant pour chaque valeur la moyenne, le maximum et le minimum. Tous les chiffres sont traduits en milligrammes par litre, sauf ceux de la dureté de l'eau qui sont indiqués en degrés français.

	Maximum	Minimum	Moyenne
Résidu fixe desséché à 105°,	211 mg	170 mg	191 mg
Résidu fixe calciné puis carbonaté,	202	152	177
Alcalinité calculée comme $CaCO^3$,	55	15	29
Matières organiques pesées par différence,	40	2	13
Matières organiques titrées par le caméléon,	47	7	23
Acide sulfurique,	59	29	39
Chlore,	8	0	—
Ammoniaque,	0	0	0
Acide azoteux,	0	0	0
Acide azotique,	traces	0	traces
Dureté totale,	20°	15°	18°
Dureté temporaire,	6	2	3
Dureté permanente,	17	12	15

II. Résumé des résultats d'analyse.

Quelle est, en partant de ces analyses, la composition des eaux du lac ?

Je commencerai par les ordonner en tableaux.

Dans un premier tableau, je réunirai les résultats des analyses directes, toujours en milligrammes par litre d'eau.

	Michaud	Ville	Risler	Lossier					Brandenbourg	Duparc	Freundler
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SO^3	43.0	39.0	34.6	37.9	37.6	37.1	38.5	36.1	33.6	38.3	36.2
Cl	1.5	2.4	0.6	1.4	1.1	1.0	1.2	1.3	0.8	1.2	1.1
CaO	45.5	63.8	60.5	58.4	61.2	64.6	64.8	63.4	58.9	64.1	65.8
MgO	2.6	10.7	4.7	9.4	10.7	13.1	10.8	9.6	5.6	10.6	11.4
K^2O	tr.	2.8	1.9	7.2	3.0	10.4	11.8	14.8	0.9		1.8
Na^2O	3,2	1.2	5.2						5.1		2.7
$Si\ O^2$	23.8	3.4	1.6	4.0	3.9	1.8	2.2	1.2	8.5	4.8	4.2
$Fe^3\ P^2\ O^8$			1.1								
NHO^2 / NHO^3	8.4	14.0		0.4	1.6	0.5	0.2	0.2		0.7	
NH^3		0.2		0.1	0	0		tr.			
CO^2 libre			59.0	8.6	18.5	23.3	22.5	26.9	37.5		
CO^2 combiné	50.7	43.5		78.8	80.1	98.2	98.2	100.4			
$Fe^2\ Al^2\ O^3$	3.8	3.6							0.7	0.5	tr.

Dans un second tableau, p. 586, je réunirai les chiffres calculés par les auteurs pour la valeur des sels dissous dans l'eau d'après les résultats de leurs analyses. (1)

Les résultats sont, on le voit, assez discordants. Seules les 5 analyses de Lossier, faites par le même auteur et avec la même méthode, pourraient être envisagées comme d'accord, et servir à tirer des moyennes. Je préfère cependant utiliser aussi les autres analyses suffisamment modernes, et les interpréter comme suit.

Je reprends mon premier tableau, qui me donne les résultats des analyses directes, et je prends les moyennes des chiffres directement pesés en n'éliminant que l'analyse Michaud, dont le résultat, évidem-

(1) Je n'ai pas fait entrer dans ce tableau les résultats trop aberrants des analyses N^os *42* à *46* qui donnent pour le sulfate de chaux de 63 à 71^mg.

	Tingry		Deville	Lossier				
	1	2	3	7	8	9	10	11
Carbonate de chaux. . .	61.6	82.5	78.9	66.1	64.1	83.7	84.8	90.0
— de magnésie .	7.5	8.2	4.9	19.7	22.5	23.4	22.7	20.2
Chlorhydrate de magnésie.	8.2	9.9	—	—	—	—	—	—
Chlorures alcalins . . .	—	—	1.7	2.3	1.8	1.7	1.9	2.2
Sulfate de chaux. . . .	41.8	29.7	46.6	51.2	59.4	42.4	41.7	31.3
— de magnésie. . .	35.2	35.2	6.3	—	—	—	—	—
— de soude	—	—	7.4	13.7	4.8	21.6	24.7	31.3
Nitrate de potassium . .	—	—	4.0	—	—	—	—	—
— de sodium . . .	—	—	4.5	—	—	—	—	—
— de calcium . . .	—	—	—	0.5	2.4	0.7	0.4	0.3
Silice.	—	—	23.8	4.0	3.9	1.8	2.2	1.2
Alumine.	2.2	1.1	3.9	—	—	—	—	—

ment fautif pour la silice, entraîne des erreurs correspondantes dans tous les autres chiffres.

J'obtiens ainsi les chiffres moyens suivants :

SO^3	36.9 mg
Cl.	1.2
CaO	62.5
MgO	9.7
K^2O	2.0
Na^2O	5.6
$Si\ O^2$	3.6

Pour transformer ces valeurs en sels dissous, on doit faire les calculs suivants : saturer le chlore par le sodium, saturer l'excédent de soude par l'acide sulfurique, l'excédent d'acide sulfurique d'abord par la potasse puis par la chaux, l'excédent de chaux et la magnésie par l'acide carbonique ; la silice reste sans changement [1]. M. Marius Jaccard, assistant au laboratoire de chimie de l'Institut agricole de Lausanne a eu l'obligeance d'exécuter ces calculs.

[1] En faisant évaporer à froid de l'eau du Rhône à Genève, Lossier a reconnu dans les résidus les cristaux des sels suivants : carbonate de chaux, sulfate de chaux, carbonate de magnésie, chlorure de sodium, sulfate de soude [Loc. cit. p. 579].

Nous obtenons ainsi :

Silice	$Si\,O^2$	3.6 mg
Chlorure de sodium	$Na\,Cl$	2.0
Sulfate de sodium	$Na^2\,SO^4$	10.4
Sulfate de potassium	$K^2\,SO^4$	3.7
Sulfate de calcium	$Ca\,SO^4$	49.8
Carbonate de calcium	$Ca\,CO^3$	74.9
Carbonate de magnésium	$Mg\,CO^3$	20.4
Total des sels minéraux dissous		164.8
Matières organiques, pertes et divers		10.2
Total des matières dissoutes ou du résidu fixe		175.0

Chaque chimiste pourra combiner à sa manière le tableau des sels. Dans l'état actuel de la science, il répond suffisamment à la réalité des faits connus.

Ce sont les chiffres que nous admettrons comme probables et représentant, jusqu'à nouvel avis, la composition chimique des eaux du Léman.

III. **Discussion des résultats d'analyse.**

En étudiant les chiffres et tableaux ci-dessus, provenant de tant de chimistes divers, il me paraît qu'on peut en tirer trois conclusions que nous aurons à discuter.

1° Les résultats généraux sont assez concordants.

2° Il y a des différences importantes entre les séries données par les divers auteurs.

3° Entre les analyses faites par le même auteur, il y a des différences sensibles.

1° *Concordance générale des résultats d'analyse.* Je crois pouvoir établir en thèse générale que la composition chimique du lac, considérée dans son ensemble, doit être invariable, ou que, si elle varie, cette variation doit être progressive et très lente. Mon raisonnement est le suivant : Le volume des eaux du Léman est énorme : 89 milliards de mètres cubes. Dans un tel volume, une variation de 1 milligramme par

litre d'une substance quelconque de matières dissoutes dans l'ensemble du lac implique un apport en plus ou en moins de 89 000 tonnes de 1000 kg de cette substance. Or il y n'y a pas d'agent externe ou interne qui puisse, d'un jour à l'autre, d'une saison à l'autre, d'une année à l'autre, faire varier dans ces proportions l'apport d'une substance. Donc dans sa généralité la composition chimique du lac est fixe et invariable.

Cependant l'ouverture à l'érosion chimique ou l'épuisement d'un gisement de substances solubles (une couche de plâtre par exemple) qui serait attaqué ou qui cesserait d'être attaqué par un affluent, pourrait augmenter ou diminuer l'apport de cette substance ; dans ce cas la variation dans la teneur des eaux du lac se développerait progressivement, mais emploierait des années et des années à se manifester.

Cela étant, la concordance générale des résultats des diverses analyses n'a rien d'extraordinaire. Ce qui est plus étrange, ce sont les différences entre ces analyses; voilà le point qui doit nous arrêter.

2° *Discordance entre les séries d'analyses faites par les divers auteurs.* Il y a des différences graves entre les résultats des divers auteurs.

J'en citerai quelques exemples.

Je prendrai d'abord la somme du résidu sec, après évaporation, séché à l'étuve avant tout traitement chimique ou calcination et je commencerai par mettre en tableau les chiffres qui nous viennent des divers auteurs.

Nos	Auteur	Date	Profondeur	Localité	Résidu total
1.	Tingry	1 février 1808	0m	Genève	160.4 mg
2.	—	5 août 1808	—	—	170.1
3.	Deville	30 avril 1846	—	—	182.0
4.	Michaud	25 février 1854	—	—	182.7
4a.	—	?	—	—	176.
5.	Ville	?	—	—	186.4
6.	Risler	18 sept. 1872	—	Nyon	170.0
7.	Lossier	30 janvier 1877	0	Genève	168.8
8.	—	21 avril —	—	—	167.6
9.	—	31 mai —	—	—	179.7
10.	—	— — —	—	—	183.7
11.	—	— — —	—	—	184.2

Nos	Auteur	Date		Profondeur	Localité	Résidu total
12.	Brandenburg	26 juillet	—	250m	Ouchy	165.7 mg
18.	Marignac	15 mars	1882	—	—	170.
19.	—	5 avril	—	—	—	168.
20.	—	8 —	—	—	—	167.
21.	—	10 —	—	—	—	174.
4b.	Michaud	mars	1884	—	—	174.5
4c.	—	—	—	—	—	176.0
22.	Marignac	5 avril	1884	—	—	175.
13.	Duparc	décemb.	1888	—	Morges	177.5
14.	Freundler	18 mars	1891	—	Genève	177.8
15.	Duparc	22 janvier	1892	310	Evian	175.9
42.	De Crousaz	24 nov.	—	0	Bouveret	230.
43.	—	— —	—	—	Ouchy	200.
44.	—	— —	—	—	Chanivaz	170.
45.	—	— —	—	—	Nyon	160.
46.	—	— —	—	—	Hermance	170.
23.	Chuard	24 février	1893	0	Ouchy	192.5
24.	—	6 mars	1893	—	—	197.5
25.	—	21 avril	—	—	—	189.0
26.	—	— —	—	—	—	188.5
27.	—	— —	—	—	—	187.5
16.	Delebecque	2 nov.	1893	—	Thonon	162.
17.	—	25 —	—	—	—	166.
28.	Chuard	20 janvier	1894	—	Ouchy	174.
29.	—	— —	—	—	—	218.
30.	—	— —	—	2	—	169.
31.	—	— —	—	5	—	166.
32.	—	— —	—	2	—	174.
33.	—	— —	—	7	—	210.
34.	—	24 mai	—	0	Genthod	187.
35.	—	— —	—	—	Crans	183.
36.	—	— —	—	—	Yvoire	184.
37.	—	— —	—	—	Gde Conche	177.
38.	—	— —	—	—	Evian	182.
39.	—	— —	—	—	St-Saphorin	176.
40.	—	— —	—	—	Chillon	188.
41.	—	— —	—	—	Bouveret	182.
47.	Seiler	1894	moyenne	—	Ouchy	191.

Si je groupe ensemble les résultats du même auteur, ou du même laboratoire, j'arrive aux moyennes suivantes :

	Nombre d'analyses.	Résidu sec.
Tingry	2	165 mg
Sainte Claire Deville	1	182
Michaud	4	177
Risler	1	170
Ville	1	186
Brandenbourg	1	166
Lossier	5	177
Marignac	5	173
Duparc, Freundler	5	177
Delebecque	2	164
Chuard et Jaccard	19	185
Seiler et Heuss	27	191

La moyenne générale des 71 analyses individuelles est 183.4mg, avec valeurs extrêmes de 160 à 218mg.

La moyenne générale des 12 groupes d'analyses des différents laboratoires est 176.1mg, avec valeurs extrêmes 164 et 191mg.

Les différences entre les groupes sont trop fortes. Elles proviennent évidemment des méthodes employées. Que les méthodes soient différentes, j'en ai la preuve dans la température à laquelle le résidu sec a été poussé ; elle n'est indiquée que par

M. Marignac à	160°
MM. Duparc et Delebecque	110°
MM. Chuard et Seiler	105°

Que la température à laquelle le résidu sec est porté joue un rôle important dans la valeur obtenue, c'est ce qui résulte de l'expérience suivante que je dois à mon collègue M. E. Chuard : (1)

Le résidu des six prises d'eau du 20 janvier 1894, après avoir été desséché à 105° d'après les « Instructions de la Société des chimistes analystes suisses », a ensuite été porté à la température de 160°, puis pesé à nouveau : il avait perdu :

(1) *E. Chuard*, in litt. 26 janvier 1894.

N° 28	8mg	et est arrivé à	166 mg
29	29		189
30	7.5		162
31	6.4		160
32	8.4		166
33	19.8		190

Les différences qui pour les résidus séchés à 105° allaient de 166 à 218, présentant un écart de 52mg, ne vont plus, séchés à 160°, que de 162 à 190, écart entre les extrêmes 28mg.

Si nous prenons quelques-unes des substances indiquées par l'analyse complète, nous trouverons de même des différences considérables. Je renvoie au tableau de la page 585, en n'indiquant ici que les extrêmes.

	Minimum			Maximum			
	mg		Nos	mg		Nos	Différence
SO^3	33.6	Brandenburg	12	43.0	Michaud	4	9.4
Cl	0.6	Risler	6	2.4	Ville	5	1.8
CaO	45.5	Michaud	4	65.8	Freundler	14	20.3
MgO	2.6	Michaud	4	13.1	Lossier	9	10.5
K^2O+Na^2O	3.0	Lossier	8	14.8	Lossier	11	11.8
SiO^2	1.2	Lossier	11	23.8	Michaud	4	22.6
etc.							

Une partie de ces différences doit évidemment être attribuée à des affaires de méthode. La silice, qui chez Michaud est de 23.8mg, tandis que la moyenne générale des autres auteurs n'est que 3.6mg, en est une illustration évidente.

Il faut donc tenir grand compte de cette possibilité d'écarts de méthode dans la comparaison que nous avons à faire des résultats des diverses analyses.

3° *Discordance entre les diverses analyses d'un même auteur.* Mais si nous nous adressons aux analyses du même auteur, ou du même laboratoire, analyses qui sont comparables entre elles dans les limites des erreurs probables, nous trouvons encore des différences considérables.

C'est ainsi que le résidu sec varie :

Michaud	de	174	à	182 mg
Lossier		168	à	184
Duparc et Freundler		176	à	178
Delebecque		162	à	166
Marignac		167	à	175
Chuard et Jaccard		166	à	218
Seiler et Heuss		170	à	211

Or, d'après les affirmations de nos chimistes, l'erreur extrême admissible dans une analyse de ce genre est ± 1mg suivant les unes, ± 5 mg suivant les autres. (1)

J'arrive aux mêmes différences si je considère les substances isolées révélées par les analyses complètes ; je ne citerai que les analyses Lossier (Nos 7 à *11*) et j'y vois :

SO^3	varier de	36.1	à	38.5 mg
Cl.		1.0	à	1.4
CaO		58.4	à	64.8
MgO		9.4	à	13.1
K^2O et Na^2O		3.0	à	14.8
$Si\ O^2$		1.2	à	4.0

De même, les analyses Nos *42* à *46* de M. H. De Crousaz font varier le sulfate de calcium de 63 à 71mg, dans cinq échantillons d'eau, levés le même jour, à la même heure, dans les diverses régions du lac.

Ces variations dépassent de beaucoup les erreurs possibles d'analyse.

Donc il y a des différences dans la composition de l'eau prise à des époques diverses ou dans des localités diverses du même lac. Ces variations peuvent être considérables. Sur le résidu total, elles peuvent

(1) L'erreur possible peut être encore plus forte pour les analyses qui ont porté sur le résidu de quantités trop faibles d'eau. Si l'erreur est de ± 1mg sur le poids de résidu de 100cmg d'eau, elle sera de ± 10mg si on multiplie ce poids par 10 pour obtenir le résidu d'un litre (Note de M. le Dr F. Seiler). Une partie des écarts qui nous étonnent ont peut-être cette cause.

Dans les analyses de l'eau du Léman, le résidu a été pesé après l'évaporation des quantités d'eau suivantes :

Analyses Risler, Marignac, Duparc, Delebecque, Freundler,		1 litre.
—	Chuard,	0.2 —
—	Seiler,	0.1 —

s'élever à 2 ou 4^{mg} d'après MM. Duparc et Delebecque, 8^{mg} d'après les résultats Michaud et Marignac, à 16^{mg} d'après les résultats Lossier, à 52^{mg} d'après le laboratoire Chuard ; au maximum 52^{mg} ou $\pm$ 26^{mg} ; ce qui, rapporté à la teneur moyenne de 175^{mg} représente un écart possible de 15 pour cent.

IV. **Variabilité dans la composition des eaux du lac.**

Cette variabilité est donc considérable ; elle demande à être expliquée. N'est-elle pas en contradiction avec la notion de la constance dans la composition chimique du Léman dans son ensemble, notion que nous avons tirée du volume énorme du lac ? Discutons les éléments de cette variabilité.

Trois faits essentiels doivent être considérés dans ce problème.

1° Le lac est alimenté par des affluents divers, de composition différente et variable. La composition générale est l'intégration des différences élémentaires de l'alimentation.

2° L'eau, pendant son séjour dans le bassin du lac, est soumise à des altérations qui doivent influencer la composition générale ou locale.

3° Les courants du lac, en mélangeant les eaux, tendent, de ces éléments différents et variables, à faire une masse uniforme. Quelle est l'importance de leur action ? Est-elle suffisante ou insuffisante pour amener à l'uniformité de composition ?

Nous allons discuter ces trois points.

1° *Les actions d'alimentation.*

L'eau amenée par les diverses rivières, affluents du lac, est différente de l'une à l'autre. Un affluent dont le bassin d'alimentation est en terrains calcaires, comme la plupart des affluents directs du lac, venant du Jura, du plateau mollassique ou des Préalpes, a une composition bien différente de celle du Rhône, dont une partie notable draine des terrains cristallins.

Nous n'avons pas encore les analyses chimiques complètes des divers affluents du Léman. La seule donnée certaine que nous possédions à ce sujet est tirée d'un travail récent de M. A. Delebecque qui rectifie, cor-

rige et complète les chiffres provisoires donnés dans notre premier volume (p. 373) sur le Rhône du Valais. M. A. Delebecque [1] a, pendant les années 1892 et 1893, analysé systématiquement les eaux du Rhône du Valais et de la Drance du Chablais sur des échantillons d'eau, levés chaque semaine ou chaque quinzaine, près de leur embouchure dans le lac. Il en a déterminé la teneur en matières dissoutes et est arrivé à des chiffres variant assez régulièrement pour que nous puissions nous borner à donner ici les valeurs mensuelles, basées sur 54 analyses d'eau du Rhône et 38 d'eau de la Drance. [2]

	Rhône	Drance
janvier	332 mg	390 mg
février	326	318
mars	319	294
avril	215	210
mai	180	215
juin	132	209
juillet	104	246
août	99	329
septembre	117	297
octobre	186	251
novembre	247	287
décembre	285	343

Les moyennes annuelles sont pour le Rhône 212mg, pour la Drance 283mg ; l'une et l'autre de ces moyennes sont notablement supérieures à la teneur générale du lac, 175mg. Les extrêmes sont pour le Rhône 92 à 354mg ; pour la Drance 132 à 474mg. La teneur de ces deux affluents principaux du Léman peut donc différer énormément en plus ou en moins de celle du lac, et les eaux de ces rivières doivent pouvoir modifier la composition générale ou locale de l'eau du Léman.

Nous arrivons au même résultat si nous interrogeons les études du professeur W. Weith de Zurich, qui a fait entrer le Léman et ses

(1) *Archives de Genève*, XXX, 666, 1893.

(2) J'ai négligé, pour les moyennes de la Drance, deux analyses qui donnent la teneur en temps de forte crue ; la quantité de matières dissoutes y est beaucoup réduite, celle du 30 décembre 1891 à 132mg, celle du 16 mars 1893 à 186mg ; elles auraient troublé la courbe très régulière que forment les autres analyses faites par un débit moyen et normal de la rivière.

affluents dans une série de recherches sur la composition chimique des eaux de la Suisse [1]. Il cherche, au moyen de la décoloration d'une solution alcoolique d'alizarine, la quantité d'acide carbonique lié, et il en déduit la quantité de carbonate de calcium contenu dans l'eau. Voici quelques chiffres intéressant notre lac :

Eau du Léman en plein lac, dates diverses			86.5 mg
Rhône, Massongex	9 février	1880	10.3
» »	8 octobre	1879	68
» Bouveret	»	1879	72.5
Avençon, Bex	»		116
Salanfe, Vernayaz	»		70.5
Trient »	»		45.5
Tinière, Villeneuve	»		150.5
Léman, port de Villeneuve	»		111.5

Grandes différences dans la teneur des eaux des diverses rivières ; c'est un fait indiscutable.

Cette variabilité des rivières a-t-elle un effet sur la composition du lac ? Pouvons-nous apprécier l'importance de la variation ?

Si nous consultons les moyennes données par M. Delebecque pour la teneur des eaux du Rhône (v. p. 594), nous y voyons que pendant les mois de juin à septembre les eaux du fleuve sont moins chargées que celles du lac, que pendant les 8 autres mois elles sont plus chargées ; en été, le Rhône, qui est alors à son grand débit, tend à altérer les eaux du lac en les diluant, en hiver en les surchargeant. Cherchons quel peut être l'effet utile de ces altérations par rapport à la composition générale du lac ; cherchons si elles peuvent la modifier sensiblement.

Nous ne disposons pas actuellement des valeurs du débit du Rhône dans l'année 1892-1893, pendant laquelle M. Delebecque a fait ses analyses d'eau ; mais en admettant que les mêmes variations mensuelles dans la teneur des eaux du fleuve seraient applicables aux années 1879 et 1886 pour lesquelles nous avons les débits du Rhône [2], nous pouvons calculer le transport d'eau et la teneur probable en matières dissoutes de l'affluent principal du Léman pour les deux sai-

[1] *W. Weith*. Chemische Untersuchungen schweiz. Gewässer, etc., Vierteljahresschr. der naturf. Gesellsch. XXV, 129. Zurich 1880.

[2] Voyez T. I, p. 360.

sons où ses eaux diffèrent de celle du lac. Sans entrer dans les détails du calcul (1) qui est d'une approximation trop peu serrée pour qu'il vaille la peine de les donner, je me borne aux résultats généraux. J'ai trouvé que dans les quatre mois d'été, de juin à septembre, le Rhône verse dans le lac environ 3700 millions de mètres cubes d'eau, d'une teneur moyenne de 110^{mg} de substances dissoutes, tandis que dans les huit mois d'hiver, d'octobre à mai, il y jette environ 1600 millions$^{m^3}$ d'eau, d'une teneur moyenne de 260^{mg}. (2)

Si ces deux masses d'eau étaient réparties immédiatement par mélange aux 89 milliards$^{m^3}$ du lac, dont la teneur générale est 175^{mg}, cette teneur serait modifiée légèrement et

abaissée à la fin de l'été, en septembre, à 172^{mg} par litre
relevée à la fin de l'hiver, en mai, à 176— —

C'est dans ces limites approximatives que s'étendrait la variabilité de la composition générale du lac, si le Rhône était le seul affluent du Léman.

Mais les autres affluents du lac ont un régime différent de celui du Rhône ; rivières de basse montagne ou de plaine, elles ont leurs

(1) Voici les éléments du calcul ci-dessus :

		Débit moyen de 1879 et 1886.	Teneur de 1892-93.	Transport probable par seconde.
Saison estivale :	juin	321$^{m3\,sec}$	132$^{mg\,l}$	42.4$^{kg\,sec}$
	juillet	414	104	43.0
	août	407	99	40.3
	septembre	282	117	33.0
moyennes		356	113	39.7
Saison hivernale :	octobre	123	186	22.9
	novembre	81	247	20.0
	décembre	52	285	14.8
	janvier	54	332	17.9
	février	51	326	16.6
	mars	60	319	19.1
	avril	78	215	16.8
	mai	121	180	21.8
moyennes		77	261	18.7

(2) Depuis que cette page a été composée, j'ai reçu les débits du Rhône en 1892 et 1893, calculés par M. l'ingénieur J. Epper, du Bureau hydrométrique fédéral, d'après ses jaugages à Outre-Rhône. La saison estivale de 1892 a donné un débit moyen de 304$^{m3\,sec}$, la saison hivernale 1892-1893 un débit de 63$^{m3\,sec}$. Le résultat général du calcul en est un peu modifié en ce sens que le débit est notablement abaissé ; mais les conclusions pour la variation du transport restent les mêmes, et les proportions relatives sont presque identiques.

grandes eaux à une autre saison que le fleuve glaciaire, qui vient des hautes Alpes ; leur teneur en substances dissoutes varie aussi d'une manière différente de celle du Rhône du Valais. Nous en trouvons la preuve dans la comparaison des chiffres donnés par M. Delebecque pour la teneur en substances dissoutes des eaux de la Drance du Chablais et du Rhône valaisan (v. p. 594). Tandis que pour le Rhône, la variation annuelle, dans la teneur des eaux en matières dissoutes, est simple et présente :

un maximum d'hiver :	janvier	332 mg
un minimum d'été :	août	99

pour la Drance, la variation est plus compliquée et montre :

un maximum d'hiver :	janvier	390 mg
un minimum de printemps :	avril	210
un maximum d'été :	août	329
un minimum d'automne :	octobre	251

Pour le Rhône, comme pour la Drance, la teneur en matières dissoutes est fonction inverse du débit ; plus l'eau est abondante, plus la solution est diluée. Aussi bien au point de vue du débit d'eau, qu'au point de vue de la teneur des eaux, le régime du fleuve alpin est presque absolument inverse de celui des rivières de plaine ou de basse montagne. Il n'y a que la saison d'hiver dans laquelle la variation soit de même signe dans les deux cas, le débit étant au minimum et la teneur au maximum.

Au point de vue de l'alimentation du lac, et en particulier de l'effet sur la composition chimique de son eau, les petits affluents du lac neutralisent en partie l'action du Rhône et diminuent certainement de beaucoup la variation qu'il occasionne. La variation de la composition chimique de l'ensemble du lac, qui devait avoir, du fait du Rhône, une valeur de 4mg de l'été à l'hiver, est réduite peut-être de moitié par l'intervention des affluents directs du lac.

Où sont versées les eaux des affluents ? Quel est leur trajet avant qu'elles soient mélangées dans la grande masse presque indéfinie du lac ? — Pour les eaux du Rhône, nous les avons vues pendant la plus grande partie de l'année descendre directement, en suivant le ravin sous-lacustre du delta immergé, dans les grands fonds du lac, s'y

étaler en nappe horizontale, et y déposer leur alluvion suspendue en formant la plaine centrale. Pour les affluents directs, non glaciaires, leur écoulement est un peu plus compliqué. Si nous en jugeons par l'exemple du ruisseau la Morge, le seul que nous ayons étudié [1], pendant la petite moitié (0.4) de l'année, les eaux de l'affluent, plus légères que celles du lac par le fait de leur température relative, s'étalent à la surface du Léman ; pendant la grande moitié (0.6) de l'année, les eaux de l'affluent descendent, ou entre deux eaux, ou dans le profond du lac. Ce dernier cas doit se présenter toutes les fois que la rivière, grossie par la pluie ou par la fonte des neiges, charrie des eaux sales et alourdies par l'alluvion. Quand donc leur transport d'eau est considérable, aussi bien pour le Rhône que pour les affluents directs, les eaux fluviatiles descendent dans les grands fonds du lac ; quand leur transport est faible, et c'est alors qu'elles sont le plus chargées de matières en dissolution, le plus souvent elles restent à la surface.

Une des causes d'altération du lac qui mérite le plus d'attention est l'eau versée par les égouts des villes riveraines. Les quantités d'eau sale sont peu importantes, mais leur forte charge en matières organiques décomposées, en microbes et en germes, peut avoir un intérêt capital au point de vue hygiénique. Les eaux d'égout seraient évidemment dangereuses, si elles entraient dans l'alimentation de l'homme et des animaux.

Les eaux d'égout sont toujours des eaux lourdes ; elles sont surchargées de matières en suspension et en dissolution, et par conséquent leur densité est supérieure à celle de l'eau relativement pure du lac. Les eaux de l'égout principal de la ville de Morges, que je surveille depuis nombre d'années, à côté du débarcadère des bateaux à vapeur, ne s'étalent jamais à la surface ; elles font cascade sur le fond de la baie et y progressent lentement en nuages arrondis et bien limités, qui cherchent les déclivités [2]. Les eaux d'égout tendent donc à descendre en masse le long des talus du lac et à gagner les grands fonds.

Elles peuvent cependant être entraînées loin de la ligne de plus

[1] T. I, p. 358.

[2] T. I, p. 389.

grande pente par un courant horizontal ; une ladière (v. p. 285), dont la vitesse est supérieure à leur écoulement très paresseux, peut les faire dévier latéralement fort loin de leur trajet naturel.

D'une autre part, les égouts entrent dans le lac à une profondeur assez faible pour que, en temps de vagues, leurs eaux se mélangent avec les eaux de surface du lac ; dans ce cas, les eaux littorales peuvent être polluées jusqu'à d'assez grandes distances. Il est vrai que, dans ces circonstances, les courants développés par le vent sont assez énergiques pour que la masse d'eau lacustre qui reçoit la petite quantité d'eau d'égout soit relativement très considérable ; au point de vue quantitatif, la solution doit être extrêmement étendue. Mais comme, au point de vue hygiénique, un seul microbe peut être nocif, il y a lieu cependant de tenir compte de cette éventualité, si l'on veut demander au lac l'alimentation d'eau d'une ville.

Les précipitations aqueuses atmosphériques, pluie, neige, grêle, eau de condensation, sont de l'eau presque pure. La pluie ne contient que 2 à 3 milligrammes d'ammoniaque et d'acides nitrique et nitreux, de nitrites et de nitrates, environ 50^{mg} de matières organiques révélables par le permanganate de potassium (1). Elle est donc, au point de vue des matières organiques, plus riche que l'eau du lac, mais pour ce qui concerne les matières minérales, elle peut être regardée comme étant de l'eau pure. Ne considérons actuellement que ce dernier point de vue. La pluie se diffuse dans l'eau de surface du lac, et en affaiblit la teneur en matières dissoutes.

Il tombe, année moyenne, environ 0.9^{m} d'eau de pluie sur la région du Léman ; sur les 582^{km^2} du lac cela représente 524 millions$^{m^3}$; l'eau séjournant en moyenne 11 ans dans la cuvette du lac (2), la chute de pluie de ces onze années a un volume de 5770 millions$^{m^3}$. Or cette quantité n'est que le 0.06 de la masse constante de 88900 millions de mètres cubes qui constitue le lac Léman. C'est donc de 6 % environ que l'action totale de la pluie dilue l'eau des affluents du lac pour la transformer en eau lacustre. C'est peu de chose.

Mais cette pluie ne tombe pas dans le lac en une fois ; elle s'y verse

(1) *Albert-Lévy*. Annuaire de l'Observatoire de Montsouris, près Paris, pour l'année 1879, p. 402.

(2) T. I, p. 451.

par ondées successives réparties assez également dans le cours de l'année (v. T. I, p. 295) pour que nous puissions affirmer que, de ce fait, les variations de la composition chimique du lac sont peu considérables ; elles sont de l'ordre des infiniment petits.

Cependant, une forte chute de pluie, comme celle du 2 octobre 1888, qui a versé, en 24 heures, une couche de 15^{cm} d'eau météorique sur le lac, sans qu'un vent violent ait mélangé les eaux superficielles avec les couches sous-jacentes [1], peut abaisser d'une manière notable la teneur en matières minérales des eaux de surface ; la couche supérieure, jusqu'à 30^{cm} de profondeur, qui est traversée par les vortex des gouttes d'eau (v. p. 238), doit, en pareil cas, être fortement diluée. Mais c'est là un effet transitoire qui disparaît sous l'action du prochain courant thermique ou mécanique.

La condensation directe de la vapeur d'eau à la surface du lac a extrêmement peu d'importance ; le point de rosée de l'air est le plus souvent au-dessous de la température de l'eau de surface, et il y a généralement évaporation. Nous pouvons considérer ce facteur comme négligeable.

En résumé, pour ce qui se rapporte aux actions d'alimentation, nous voyons des causes de différenciation locale, agissant probablement, et dans des proportions assez importantes, sur les eaux de surface et sur les eaux des très grands fonds ; les eaux des couches moyennes semblent à l'abri de ces influences directes.

2° *Les actions d'altération.*

Pendant le très long stationnement que l'eau fait dans le Léman, — nous avons vu que l'eau du Rhône y séjourne en moyenne pendant onze ans — elle est modifiée par quelques actions que nous devons signaler.

1° L'*évaporation* de la surface, en enlevant de la vapeur d'eau pure, concentre la solution des eaux du lac. Cette action est très efficace sur les eaux de certaines mers fermées ; pourquoi ne le serait-elle pas sur le Léman où les eaux séjournent assez longtemps pour qu'il vaille la peine d'en tenir compte ?

Quelle est l'importance de l'évaporation à la surface du lac ? Cela

[1] T. I, p. 532.

est difficile à dire, impossible même actuellement ; nous n'avons que des observations faites sur terre ferme dans des conditions trop différentes de celles du lac pour qu'elles soient comparables. La série la plus complète est celle des observations siccimétriques de Louis Dufour. De 1865 à 1876, soit pendant 10 ans, il a mesuré l'évaporation qui se produisait sur un bassin de 1965$^{cm^2}$, enterré jusqu'à son bord, dans un jardin de Lausanne ; la valeur moyenne de l'évaporation de cette série d'observations a été année moyenne de 734^{mm} (1), ce qui donne une valeur journalière de 2^{mm} (2). Dans les circonstances les plus favorables la valeur journalière de l'évaporation s'est élevée à 7, à 8, à 9^{mm}, à 9.8^{mm} même, du 22 au 23 juin 1870 (par un ciel toujours serein et avec un temps de bise parfois violente) (3). Admettons que 1 centimètre par jour soit l'épaisseur maximale de l'eau enlevée par l'évaporation à un bassin situé dans un jardin dans les faubourgs de Lausanne.

Mais, ainsi que Louis Dufour l'a lui-même reconnu, il est presque impossible de passer d'observations faites sur une aussi petite échelle au phénomène qui se produit sur un grand bassin tel qu'un lac. Les conditions sont trop différentes. A la surface d'un vase de petite étendue, les masses d'air saturées par l'évaporation sont déplacées et remplacées facilement par d'autres couches d'air plus sèches, capables de provoquer une évaporation nouvelle. A la surface d'un lac, au contraire, l'air, longtemps en contact avec la couche aqueuse, se sature d'humidité et, quoique charrié par les brises et par les vents, il n'est plus capable d'enlever autant de vapeur d'eau à la nappe lacustre. L'évaporation peut être fort active dans les zones périphériques du lac, et, en cas de vents généraux, dans la partie du lac sur le vent ; elle doit être faible ou nulle dans les régions centrales du lac et dans les parties sous le vent. Sous ce rapport, les coefficients d'évaporation étudiés sur des vases ou bassins de petite étendue sont trop forts et ne peuvent être appliqués sans une notable réduction à l'ensemble d'un lac de grande superficie.

D'autre part, la surface d'un lac, tourmentée par les vagues, doit offrir des conditions d'évaporation bien plus puissante que la nappe

(1) Les chiffres qui expriment la valeur de l'évaporation sont donnés en épaisseur de la couche d'eau enlevée.

(2) Bull. S. V. S. N. XIII, 375 et 687. Lausanne 1875.

(3) Ibid. XI, 161. 1873.

calme, non ridée, d'un vase d'expérience ; les vagues déchirées, moutonnantes, à crête réduite en poussière par le vent, représentent de bonnes surfaces d'évaporation, et par les jours de forte bise, où l'air est rapidement renouvelé à la surface du lac, le dégagement des vapeurs doit être puissant et actif.

Admettons que la valeur maximale journalière de l'évaporation sur le lac soit 10^{mm} (c'est certainement trop fort) ; admettons que nous ayons une période sèche de 30 jours consécutifs, sans grands vents qui mélangent mécaniquement les couches du lac. Ce serait une couche d'eau de 30^{cm} qui serait enlevée à la surface du lac, et l'eau sous-jacente serait certainement concentrée. Mais l'eau de surface n'est pas immobile ; même par le calme plat, elle est soumise, comme nous l'avons vu en traitant de la thermique du lac (p. 369), à des courants verticaux de convection journalière qui, en été (c'est la saison où l'évaporation est la plus forte), mélangent chaque nuit les couches supérieures jusqu'à 10 et 15^{m} de profondeur. C'est donc sur une couche de 10^{m} au moins que se répartit cette concentration due à l'évaporation ; 30^{cm} sur 10^{m} représentent le 3 %. C'est donc au maximum une variation de 3 % dans la composition chimique des eaux de surface que nous pouvons attribuer à l'évaporation ; cette variation étant du reste atténuée et détruite par la première pluie ou le premier grand vent qui interrompt la période de sécheresse et de calme absolu.

2° Une seconde cause de modifications serait la *précipitation* des éléments dissous par le fait des variations de température de l'eau. Pendant l'hiver les eaux de surface sont moins chaudes qu'en été ; elles sont par conséquent moins capables de tenir en dissolution des sels. Il n'est pas impossible que de ce fait il n'y ait une légère variation dans la composition de l'eau ; mais elle est certainement très faible, et je dois me borner à indiquer cette possibilité sans que je sache comment la discuter et l'apprécier. [1]

3° Enfin les *organismes* végétaux et animaux fixent dans leurs tissus quelques sels minéraux et de la matière organique. La silice est

[1] Une observation curieuse qui montre l'importance possible de tels précipités est la suivante : le 24 juin 1873 je relevai un appareil photographique qui avait séjourné pendant 3 jours à 60^{m} de profondeur devant Morges : les fils de laiton qui supportaient la plaque de fer de l'appareil étaient recouverts d'une couche très bien marquée de carbonate de chaux, cristalisé en rhomboèdres, et faisant effervescence dans l'acide acétique. Y avait-il eu entre le fer et le cuivre formation d'un couple électrique qui aurait exagéré la précipitation ?

nécessaire à la vie de quelques spongiaires, infusoires et algues ; le carbonate et le phosphate de calcium entrent dans la composition des os des vertébrés et des coquilles des mollusques : le carbonate calcaire est fixé par les algues dites incrustantes. D'une autre part tous les animaux et végétaux prennent la substance de leurs tissus, directement ou indirectement, dans la matière organique dissoute dans l'eau. Or le développement de la vie animale et végétale est soumis à des variations saisonnières importantes ; la vie est plus active quand la température s'élève. De ce fait il doit y avoir une variation saisonnière dans la teneur de l'eau du lac en matières dissoutes, minérales et organiques. Je n'en veux pour preuve que le magnifique développement de la flore littorale, dans le printemps, qui implique une fixation importante de matières ligneuses et protoplasmatiques.

Dans certains lacs, les roches et cailloux du littoral sont recouverts par une très abondante végétation d'algues calcaires que nous étudierons, à propos des galets sculptés, dans un chapitre ultérieur. Ces algues fixent évidemment une grande quantité de sels calcaires. Mais cette végétation est presque nulle dans le Léman, et nous n'avons pas à en tenir compte.

Jusqu'à nouvel avis, je ne pense pas que les variations saisonnières dans le développement inégal des organismes vivants soient d'action sensible sur la composition chimique des eaux de notre lac.

En résumé, s'il y a lieu de tenir compte des actions très faibles d'altération que subissent les eaux du lac pendant leur séjour dans le bassin du Léman, elles se font sentir uniquement dans les eaux de surface ; les eaux des couches moyennes et profondes en sont complètement à l'abri.

3° *Les actions de mélange.*

Les actions qui mélangent les eaux du lac sont puissantes et nombreuses. Nous avons vu précédemment (p. 278 et 282) que les courants mécaniques dus aux vents et aux inégalités de la pression atmosphérique font circuler les eaux dans le sens horizontal ; que les courants thermiques (p. 276) font circuler les eaux dans le sens vertical. Il y a dans le lac une circulation compliquée et irrégulière qui doit tendre à en mélanger les eaux. D'une autre part la diffusion doit tendre à égaliser la composition chimique des couches voisines ; celle qui est

plus concentrée livre une partie de ses substances dissoutes à celle qui l'est le moins.

Il semble que ces phénomènes doivent mélanger entièrement la masse du lac et amener ses eaux à une composition uniforme. Et cela paraît d'autant plus probable que, en somme, le Léman représente un bassin de très faible profondeur. Nous avons vu [1] que la profondeur maximale du lac n'est que le $^1/_{15}$e de sa plus grande largeur, que le $^1/_{237}$e de sa longueur ; si l'on faisait à l'échelle du 1 : 100 000e, un modèle exact du lac, sa profondeur ne serait que de 3 millimètres ; ce serait l'épaisseur d'une lame d'eau répandue librement sur une table de marbre. A première vue, dans de telles conditions, les mélanges doivent être, semble-t-il, très actifs. Ces eaux si différentes, qu'amènent les divers affluents et la pluie, doivent se pénétrer en une masse uniforme, et les faibles altérations qu'y peuvent apporter l'évaporation et les précipitations chimiques et biologiques doivent disparaître ou être inappréciables. J'avoue que jusqu'à présent j'ai cru à l'uniformité presque absolue des eaux de la masse entière du lac, et j'attribuais les différences signalées par les chimistes à des erreurs d'analyse.

Mais en discutant plus attentivement les faits et les chiffres, je suis arrivé à modifier complètement cette appréciation, et j'arrive actuellement à des conclusions tout opposées.

Je constate tout d'abord que les différences que présentent les études faites par le même auteur dépassent, et de beaucoup, les erreurs possibles de l'analyse. Donc, en réalité, il y a des différences locales et générales dans la composition de l'eau. Cela étant, les préjugés théoriques doivent s'incliner devant l'inflexibilité des faits.

En second lieu, je viens de bien constater que l'alimentation par la pluie et par les affluents amène dans le lac des masses d'eau de teneur fort différente qui sont versées, la pluie à la surface du lac, les eaux des rivières dans des régions localisées près de l'embouchure des affluents ou dans les grands fonds du lac. Par l'alimentation du lac il y a juxtaposition de masses d'eau différentes ; jusqu'à ce que le mélange soit opéré, la composition du lac ne peut être uniforme. — Je laisse de côté les altérations subies par l'eau pendant son séjour dans le lac ; même celles qui proviennent de l'évaporation doivent être excessivement faibles.

[1] T. I, p. 59.

En troisième lieu, si je discute les actions de mélange, je dois reconnaître que leur effet ne peut être ni si prompt, ni si efficace que nous l'avons pensé jusqu'à présent.

La diffusion entre des masses d'eau de composition différente s'opère très énergiquement et rapidement dans un vase d'expérience de petite taille ; mais dans un bassin qui mesure des centaines de mètres de profondeur, et des dizaines de kilomètres d'étendue, ces réactions de molécule à molécule peuvent être négligées. Dans le plan limite entre deux masses d'eau différentes la diffusion peut être active et d'effet utile ; mais si la masse d'eau a des dizaines et des centaines de mètres d'épaisseur ou de largeur, les parties centrales ne réagiront qu'au bout d'un temps relativement long.

Les courants mécaniques dus aux vents font-ils un mélange bien intime des eaux en présence ? Oui, s'il s'agit de la couche supérieure, brassée par les vagues dans une grande tempête ; mais cette couche ainsi tourmentée ne dépasse pas un ou deux mètres d'épaisseur. Oui, s'il s'agit des eaux littorales à la côte sous le vent, battues par les vagues qui viennent rouler sur une plage ou se heurter contre une muraille rocheuse ; mais cette zone ne dépasse pas quelques centaines de mètres de largeur. Quant aux courants de révolution interne développés par les vents, courant d'aller superficiel, courant de retour profond, dans les plans limites entre la couche en mouvement et la couche immobile, il se détermine certainement des remous qui font des mélanges. Mais cette action se borne à une couche peu épaisse, la grande masse des eaux subit un transport d'ensemble sans mélange appréciable.

Il en est de même des courants mécaniques dus aux variations locales de la pression atmosphérique

Les courants thermiques sont très probablement, eux aussi, des courants d'ensemble ; les déplacements provoqués par les changements de densité de l'eau qui se refroidit ou se réchauffe, se font par grandes masses et non par filets isolés ; il y a révolution générale et non mélange moléculaire (V. p. 277).

Il me paraît probable que les masses d'eau restent longtemps distinctes, et gardent leur caractère individuel pendant des heures, des jours, des semaines ; que, à moins de circonstances exceptionnelles, ce n'est qu'au bout d'un temps fort long qu'elles se mélangent avec les couches ambiantes. Ce mélange s'opèrera finalement, cela va sans

dire ; au bout de quelques semaines, mois ou années, l'eau versée par un affluent ou tombée en pluie se perdra dans la masse indéfinie du lac ; mais ce procès ne sera achevé qu'après un temps probablement fort long, beaucoup plus long que celui que nous avons admis jusqu'à présent.

Je me figure par exemple que l'eau du Rhône d'été, descendue au fond du lac, étalée sur la plaine centrale, y séjournera fort longtemps avec ses caractères propres, avant de se confondre par mélange avec la grande masse du lac. Ce serait une jolie surprise pour nos chimistes analystes s'ils parvenaient à en déceler la présence.

Incapables que nous sommes de pénétrer dans les profondeurs du lac, nous ne voyons que la surface, et dans cette surface nous ne pouvons distinguer à l'œil les eaux de composition différente. Il est cependant certaines circonstances où nous arrivons à reconnaître ces masses d'eau à caractères individuels. J'ai raconté, page 280, l'étrange apparence des eaux côtières de la rive nord du lac quand les courants de retour de la bise amènent à la surface les eaux opalinisées par les troublons du Rhône. — Lorsque les eaux sales du Rhône ou d'un affluent débordé se sont versées à la surface du lac, on voit, pendant bien des jours parfois, le lac bigarré par des taches verdâtres qui se promènent à distance, entraînées par le jeu des courants ; de la hauteur des monts de La Vaux, de Glyon ou de Naye, on jouit souvent de ce spectacle. — Dans mes notes sur la couleur du lac, je trouve le fait suivant : Le 23 mai 1886, un fort orage de pluie sur Lausanne avait gonflé le Flon qui avait charrié dans le lac de grandes masses d'eau sale. Le 25 mai, je naviguais au large avec Hörnlimann sur le *Sondeur* : nous trouvâmes le soir, jusqu'à un kilomètre au large d'Ouchy, une grande étendue d'eau opaline verdâtre dont je fixai la teinte avec mes crayons de pastel ; j'inscrivis que l'eau avait en ce point-là la couleur du lac des Quatre-Cantons. Le 1er juin, soit 9 jours après l'orage du 23 mai, en passant en bateau à vapeur d'Ouchy à Morges, je retrouvai encore une de ces masses d'eau verte très distincte et très nettement caractérisée.

Cela étant ainsi, nous avons l'explication fort simple des différences très notables que nous constatons dans les analyses d'eau du lac faites par le même chimiste. Le lac est formé par la juxtaposition d'une foule de masses d'eaux différentes qui ne se pénètrent et ne se mélangent

que petit à petit. Chaque prise d'eau peut donner un résultat différent de la prise voisine.

Il paraît probable que le mélange s'opère de plus en plus à mesure que l'on avance en descendant le cours du lac. Les grandes causes d'altération sont les masses d'eau apportées par les affluents ; les plus importantes sont le Rhône, la Drance, la Venoge, qui se versent dans le Grand-lac, la Promenthouse à l'entrée du Petit-lac ; les eaux alourdies par la charge d'alluvion des trois premiers affluents s'accumulent au fond de la cuvette de la plaine centrale. Dans le Petit-lac il n'y a comme cause d'altérations que la Promenthouse et quelques petits ruisseaux sans importance. Quant à l'eau lacustre qui arrive au détroit de Promenthoux pour s'écouler vers Genève, il est probable que pendant son long séjour dans le Grand-lac, un mélange plus ou moins parfait a dû s'opérer. Je suis donc disposé à croire que l'eau est beaucoup plus uniforme dans le Petit-lac que dans le Grand-lac, à Genève plus que partout ailleurs. Ce serait conforme au fait que les plus grandes divergences dans les séries de résultats d'un même auteur nous viennent des analyses Chuard et Seiler qui ont pris leur eau devant Ouchy (analyses N°s 23 à 33 et N° 47), tandis que la plupart des autres séries ont été levées dans la rade de Genève.

Il y a là, ce me semble, sujet à de nouvelles recherches qui amèneront sans doute à des constatations intéressantes ; nous nous permettrons de les recommander à nos amis les chimistes qui peuvent disposer de temps et de patience. Nous aurons du reste à revenir sur ces questions quand nous discuterons bientôt les recherches de Ch. de Marignac sur les matières organiques dissoutes dans l'eau de Genève.

J'ai cru avoir trouvé la preuve de ces différences systématiques régionales dans la composition de l'eau du Léman. Les analyses N°s 42 à 46 de M. H. De Crousaz montraient une diminution frappante du résidu sec à mesure que la prise d'eau était plus aval sur la longueur du lac. Les chiffres variaient de 230^mg^ par litre près de Villeneuve, à 160^mg^ dans le Petit-lac. Pour vérifier ce fait, MM. Chuard et Jaccard ont eu l'obligeance de répéter des analyses comparatives sur de l'eau que j'avais puisée le 24 mai 1894 dans les diverses régions du lac (analyses N°s 34 à 41) ; les quantités du résidu solide ont varié de 176

à 188mg ; mais cette variation n'a point été systématique et n'a point progressé régulièrement suivant la position de la prise d'eau sur l'axe du lac. Le fait indiqué par les analyses de M. De Crousaz ne se confirme donc pas, du moins dans la saison du printemps.

V. **Matières dissoutes dans l'eau du lac.**

1° *Matières minérales.*

Au sujet de la composition chimique des eaux du lac, nous ferons les remarques suivantes :

a. La teneur en matières dissoutes 175mg est loin d'être le maximum connu qui s'élève à 200, 250, 300mg pour d'autres eaux lacustres, eaux de lacs d'eau douce, cela va sans dire, eaux de lacs à émissaire permanent. Mais elle est beaucoup plus forte que celle des lacs des régions granitiques dont la teneur ne s'élève qu'à 20 et 80mg. (1)

b. La teneur en carbonate terreux, carbonates de chaux et de magnésie, 95mg, est assez forte. Elle s'explique facilement par la nature calcaire, et parfois dolomitique d'une notable partie du bassin d'alimentation du Léman, chaîne des Alpes bernoises-valaisannes, Hautes-Alpes calcaires, Préalpes vaudoises et chablaisiennes, plateau molassique, Jura vaudois.

c. La teneur en sulfates 64mg, sulfate de chaux en particulier, est considérable. Elle est due à la présence de gypse dans plusieurs vallées du bassin d'alimentation, en particulier dans la grande vallée du Rhône valaisan, à Bex, à Armoy dans la vallée de la Drance, etc. Ces gisements sont peu considérables comparés à l'immense étendue des roches carbonatées ; mais la solubilité du gypse étant beaucoup plus grande, une très forte quantité est entraînée par l'eau des affluents.

M. A. Delebecque, dans ses analyses récentes (2) a montré que soit l'eau du Rhône du Valais, soit l'eau de la Drance contiennent, suivant

(1) Cf. Analyses de MM. Duparc et Delebecque sur les eaux des lacs du plateau central de France. Archives de Genève, XXVIII, 504. 1892.

(2) [Loc. cit. p. 594].

les saisons, du tiers à la moitié de leur résidu fixe total sous forme de sulfate de calcium. Voici le résumé de ses chiffres :

	Saison.	Nombre d'analyses.	Résidu fixe total.	Sulfate de chaux.
Rhône	janvier-février	4	324 mg	187 mg
	juin-août	6	103	37
Drance	janvier	2	447	259
	février	1	282	93

Des analyses plus complètes des eaux du Rhône ont donné à M. Delebecque :

	Eaux d'hiver.	Eaux d'été.
$CaSO^4$	183 mg	37 mg
$CaCO^3$	91	41
$MgCO^3$	50	13

Profitons de ces chiffres très précis, qui indiquent une variation énorme dans la teneur en sulfate de chaux de l'affluent principal du Léman, pour chercher quel peut en être l'effet sur la composition générale du lac. Nous avons calculé sur les mêmes bases que notre calcul de la page 596, quel est le transport d'eau du Rhône en divisant l'année en deux saisons égales de six mois chacune. Multiplions ces chiffres par la teneur des eaux en sulfate de chaux et nous aurons le transport de gypse par le Rhône dans les deux saisons :

		Débit total du Rhône.	Teneur en gypse dissous de l'eau du Rhône par litre.	Transport total par le Rhône en gypse dissous.
ÉTÉ.	Mai à octobre.	4.478.000 m3	37 mg	265 000 kg
HIVER.	Novembre à avril.	978.000	183	178 000
			différence. . .	87 000

Or nous avons vu (p. 587) que pour faire varier d'un milligramme par litre la teneur de l'ensemble de l'eau du Léman en une substance quelconque, il faut un apport en plus ou moins de 89 000 tonnes. Ici nous n'avons une différence que de 87 tonnes. C'est donc à moins d'un millième de milligramme par litre que se limite la variation générale de la teneur en sulfate de chaux des eaux du lac de l'été à l'hiver.

De même que le Rhône et la Drance, les sources des Préalpes

vaudoises contiennent une assez forte proportion de sulfate de chaux :

Eaux du Pont de Pierre (analyse Risler)	174 mg
Eaux des Avants (analyse J. Brun)	147 (1)

La proportion relative des sulfates est donc considérable dans les eaux du Léman ; si leur quantité absolue était plus grande, on classerait ces eaux dans la catégorie des eaux séléniteuses.

d. Outre les sels minéraux signalés dans les analyses, nous avons à indiquer les traces d'acides et de bases azotées qui se rapprochent des substances organiques, à savoir :

Les acides nitreux et nitrique. Lossier a constaté des quantités très faibles de nitrites et de nitrates, en général de 0.1 à 0.4mg dans un seul cas, analyse N° 8, 1.6mg. Graebe et Guye en ont trouvé des traces seulement. Marignac n'en a pas trouvé traces, en tous cas moins de 1mg.

Chuard et Jaccard en indiquent des traces dans leurs 5 premières analyses (Nos 23 à 27), des quantités allant de 1.0 à 2.5mg d'acide nitreux dans leurs analyses (Nos 28 à 33). Seiler dans ses 27 analyses trouve zéro d'acide nitreux et de très faibles traces d'acide azotique.

Pour l'ammoniaque, Lossier en a trouvé 3 fois des traces :

Analyse n° 7	0.065 mg
10	traces
11	0.019

dans les deux autres analyses : zéro. Marignac n'a pas constaté la présence d'ammoniaque ; et cependant son réactif de Nessler révélait 0.1mg d'ammoniaque par litre. Les analyses d'eau recueillie devant Ouchy ont donné à MM. Chuard et Jaccard de 0.4 à 0.5mg, à M. Seiler zéro d'ammoniaque.

2° *Matières organiques.*

Quant aux matières organiques dissoutes dans l'eau du Léman, elles ont donné lieu à de nombreuses recherches qui aboutissent toutes à des résultats suffisamment concordants. Elles ont été faites par la méthode de Kubel qui utilise la décoloration du permanganate de potassium par la matière organique oxydable.

(1) Etude sur les eaux d'alimentation, p. 66 à 71. Lausanne 1881.

Je connais les séries d'expériences suivantes :

1° Lossier. 6 analyses, Nos 7 à *11*, de janvier à mai 1877.

2° C. Græbe et Ph. Guye. 22 analyses, de juin à décembre 1881. (1)

3° C. Hahn. 8 analyses, de décembre 1881 à mai 1882. (2)

4° Ch. Marignac. 282 analyses, de 1882 à 1884. (3)

5° L. Michaud. 2 analyses, mars 1884. (4)

6° Chuard et Jaccard. 11 analyses, Nos *23* à *33*, février et mars 1893, janvier 1894.

7° Seiler. (No *47*) 27 analyses à diverses époques de l'année 1894.

Les cinq premières séries ont été faites sur l'eau du lac à Genève, les échantillons étant levés soit dans la rade, soit dans le port, soit dans les canaux du service hydraulique de Genève qui puisait alors son eau dans le port, au milieu du courant. Les dernières séries ont été faites sur de l'eau puisée en plein lac, devant Ouchy.

Les résultats de ces analyses sont assez concordants : je donnerai plus bas les moyennes tirées de la série, la plus abondante, de M. de Marignac. J'indique la quantité de matière organique contenue dans un litre d'eau en admettant (ce qui, d'après M. de Marignac, est encore trop élevé) que le permanganate décolore un poids quintuple de matière organique :

	Date.		Matière organique.
Lossier	30 janvier	1887	14.9 mg
	21 avril	—	14.5
	31 mai	—	7.5
Græbe et Guye	24 juin	1881	15.1
	28 »	—	7.2
	10 juillet	—	11.2
	21 »	—	23.9
	29 septembre	—	16.2
	30 »	—	10.0
	10 octobre	—	6.4
	12 décembre	—	5.6

(1) Archives de Genève, VII, 144. 1882.

(2) *Journal de Genève*, 1er juin 1882.

(3) [Loc. cit., p. 581].

(4) Journal *Le Genevois*, 19 mars 1884.

	Date.		Matière organique.
C. Hahn	25 décembre	1881	8.8 mg
	26 mai	1882	7.6
L. Michaud	mars	1884	5.9
	—	—	6.1
Ch. de Marignac	moyenne de 282 analyses		5.5 mg
	maximum		9.1
	minimum		2.1
Chuard et Jaccard	27 février	1893	31.7
	6 mars	—	34.7
	21 avril	—	30.3
	—	—	38.5
	—	—	31.9
	20 janvier	1894	11.4
	—	—	8.6
	—	—	8.6
	—	—	7.2
	—	—	17.2
	—	—	8.6
Seiler	dates diverses 1894	maximum	47 mg
	— —	minimum	7
	— —	moyenne	23

Les résultats obtenus par chaque auteur sont, dans les limites du simple au triple, assez semblables entr'eux. Les différences entre les séries viennent en grande partie de variantes dans la méthode, dans le procédé ou dans l'équation personnelle de l'expérimentateur. (1)

La plus belle série d'expériences a été faite par M. Ch. de Marignac

(1) Il vient de paraître, trop tard pour que je puisse en incorporer les résultats dans mon texte, la très importante et très intéressante étude de M. Léon Massol, bactériologiste à la Salubrité de Genève : Les eaux d'alimentation de la ville de Genève, Genève 1894. M. Massol a, pendant une série continue de 22 mois, de mars 1892 à décembre 1893, étudié entr'autres les eaux de la rade de Genève. Il a, dans 295 jours de cette période, déterminé la quantité de matière organique contenue dans l'eau du lac, en suivant la méthode Albert-Lévy (Annuaire de l'observatoire de Montsouris pour 1894, p. 287, Paris 1894). Je tirerai des tableaux de M. Massol les valeurs moyennes et extrêmes, en les exprimant comme lui en quantité d'oxygène emprunté au permanganate de potasse pour oxyder la matière organique d'un litre d'eau. A côté de ces chiffres, pour rester fidèle à la notation employée dans mon étude, je les traduis en les quantités de matière organique que cela représente, en admettant que l'oxygène fourni par le permanganate est le

et poursuivie pendant plus de deux ans, de mars 1882 à juin 1884 ; les résultats généraux, très uniformes, sont les suivants :

Le maximum obtenu a été	9.1 mg
le minimum	2.1
la moyenne générale	5.5

Je ne veux pas copier ici l'ensemble du tableau de M. Marignac, ce qui nous entraînerait trop loin. Je veux seulement donner une idée de l'ordre des variations qu'il a constatées dans la teneur des matières organiques, et je choisirai mes exemples dans deux séries d'une douzaine d'expériences, l'une dans la période où les eaux étaient le plus riches, l'autre le moins riches en matières organiques. Je multiplie toujours par 5 la quantité de permanganate nécessaire pour l'oxydation, de manière à avoir la quantité probable des matières organiques dans un litre d'eau :

forte teneur.		teneur faible.	
4 octobre 1883	7.7 mg	3 août 1882	4.2 mg
8 —	7.7	7 —	3.5
11 —	8.4	10 —	2.8
15 —	8.4	14 —	2.1
18 —	8.4	17 —	5.2
22 —	8.4	21 —	3.1
25 —	9.1	24 —	3.5
29 —	8.4	29 —	3.5
1 novembre	8.4	31 —	4.2
5 —	7.7	4 septembre	3.5

Il y a des variations assez bien marquées, variations saisonnières irrégulières : pendant certaines séries du mois la quantité était plus

1/4.5 du poids de celui-ci, et que le permanganate décolore un poids quintuple de matières organiques.

	Oxygène absorbé par l'oxydation de la matière organique.	Matières organiques contenues dans un litre d'eau.
Minimum	0.33 mg	7.4 mg
Maximum	0.81	18.2
Moyenne	0.54	12.1

La variation dans la teneur en matière organique de l'eau est relativement faible : elle ne dépasse guère le rapport du simple au double. J'ajouterai que, dans les résultats de M. Massol, il y a une indication assez nette d'une diminution de la quantité de matières organiques dans les eaux d'été. J'y reviendrai quand, dans un autre volume, je traiterai de la biologie du lac.

forte, pendant d'autres moins forte, ainsi que l'indique le tableau suivant des moyennes mensuelles :

	1882	*1883*	*1884*
décembre		4.8 mg	6.6 mg
janvier		7.7	6.7
février		5.2	6.6
mars	6.5 mg	4.5	6.8
avril	6.9	3.8	6.1
mai	5.9	4.3	6.2
juin	5.9	4.2	6.6
juillet	5.0	5.0	
août	3.6	5.1	
septembre	4.2	5.6	
octobre	3.5	8.3	
novembre	3.9	7.6	

Si je groupe ces moyennes mensuelles d'après les saisons j'obtiens :

hiver	6.5 mg
printemps	5.7
été	5.0
automne	5.5

Mais cette variation saisonnière n'est pas régulière, l'automne de 1882 a donné des chiffres beaucoup moins élevés que celui de 1883 ; le printemps de 1883 des chiffres plus faibles que ceux de 1882 et 1884 ; le printemps de 1882 a eu des chiffres plus forts que l'automne de la même année, tandis qu'en 1883 c'était l'inverse. M. Marignac ne reconnaît pas de variation annuelle régulière.

M. Marignac attribue ces variations dans la matière organique à la pluie. Celle-ci, en lavant l'air, se charge de matières organiques et par conséquent augmente la teneur des eaux de surface ; de même les eaux des affluents grossis par la pluie se répandant en certaines saisons à la surface du lac [1]. Pour la discussion de ces variations je

[1] Je me permets de mettre un point d'interrogation à cette dernière interprétation. L'eau des affluents est en général, par leur température, plus dense que celle de la surface du lac. C'est toujours le cas lorsque l'affluent est grossi par les pluies ou la fonte des neiges et que les eaux sont salies par l'alluvion qu'elles transportent. Dans ce cas les rivières font une *bataillière* à leur entrée dans le lac (v. T. I, 358 à 386).

renvoie le lecteur au mémoire original du savant chimiste genevois.

Quoi qu'il en soit de ces variations et de leurs causes, je constate que la quantité de matières organiques contenues dans le lac est faible. En moyenne, dans les recherches de M. Marignac, elles n'oxydent que 1.1^{mg} de permanganate de potassium. Si l'on accepte la notion, généralement admise, que le permanganate oxyde un poids quintuple de matières organiques, c'est une moyenne de 5.5^{mg} de matières organiques que contiennent les eaux du Léman, étudiées à Genève.

Tandis que les analyses faites par la méthode de Kubel sur les eaux du Petit-lac à Genève, par MM. Lossier, Græbe et Guye, Hahn, Michaud et Marignac donnent toutes des quantités très faibles de matières organiques, de 5 à 24^{mg} par litre, les premières analyses de MM. Chuard et Jaccard arrivent à des chiffres beaucoup plus forts ; les eaux d'Ouchy, au printemps de 1893, contenaient de 30 à 35^{mg} de matières organiques (analyses N°s 23 à 27) ; les analyses de janvier 1894 (N°s 28 à 33) restent, il est vrai, dans les limites de 8 à 17^{mg}. Les analyses Seiler, N° 47, indiquent une variation aussi considérable.

Ces faits sont assez conformes avec ce que j'ai dit plus haut de la variabilité probable des eaux du lac.

Je rapproche de ces résultats donnés par la méthode de Kubel les analyses faites par la méthode des pesées directes après calcination pour déterminer la quantité des matières organiques contenues dans le résidu sec de l'eau. Nous avons à ce point de vue les chiffres suivants :

Lossier	N° 7	Genève	30 janvier	1887	14.9^{mg}
	8	—	21 avril	—	14.5
	9	—	31 mai	—	7.5
	10	—	—	—	8.7
	11	—	—	—	11.2
Chuard et Jaccard	23	Ouchy	27 février	1893	55
	24	—	6 mars	—	59
	25	—	21 avril	—	50
	26	—	—	—	51
	27	—	—	—	51
	28	—	20 janvier	1894	46
	29	—	—	—	45

Chuard et Jaccard	30	Ouchy	20 janvier	1894	40 mg
	31	—	—	—	46
	32	—	—	—	38
	33	—	—	—	57
	34	Genthod	24 mai	—	24
	35	Crans	—	—	32
	36	Yvoire	—	—	30
	37	Thonon	—	—	15
	38	Evian	—	—	25
	39	St-Saphorin	—	—	4
	40	Chillon	—	—	30
	41	Bouveret	—	—	27

Les pesées directes donnent toutes des quantités notablement plus grandes de matières organiques que la méthode de l'oxydation par le permanganate de potassium ([1]). Faut-il attribuer cette différence à l'eau de composition qui n'aurait pas été suffisamment éliminée dans la dessication première du résidu ? ou bien est-elle due à la nature des matières organiques ?

Quelle est la nature de ces matières organiques de l'eau du lac ? Cette question n'a pas encore été suffisamment étudiée. Toutes les substances azotées, tous les hydrocarbures sont facilement oxydables par le permanganate de potassium ; tous sont donc indistinctement révélés par ce réactif. De même, ce ne sont pas seulement les matières dissoutes, mais encore les matières en suspension, si elles sont suffisamment réduites en volume, qui peuvent réagir sous l'action du permanganate ; les poussières organiques, les microbes, les microzoaires et les microphytes sont de la matière organique oxydable ([2]). Peut-être doivent-ils entrer en ligne de compte.

Il est probable que la nature de ces matières organiques varie dans le temps et dans l'espace, dans les diverses saisons, dans les diverses années d'une part, d'autre part dans les diverses régions et dans les

([1]) Les analyses Seiler. N° 17, arrivent à un résultat inverse. Par le caméléon il a trouvé une moyenne de 23mg par la pesée directe 13mg, avec extrêmes de 2 à 40mg.

([2]) Mlle C. Schipiloff, en purifiant les eaux infectes par le permanganate de potasse et de soude, a montré l'action de ces sels sur les microbes et germes organiques. L'eau ainsi traitée est stérilisée ; donc les microbes sont tués par oxydation. (Archives de Genève, XXIX, 99, 1893).

diverses couches du lac; il est probable que les conditions variables de l'alimentation du lac par des affluents nombreux et à variations considérables, que les conditions variables du développement de la vie animale et végétale, des phénomènes de putréfaction, de fermentation et d'oxydation régissent cette variabilité en teneur de matières organiques; il est probable enfin que les conditions météorologiques de la saison y ont aussi leur influence. Arrivera-t-on jamais à démêler ces facteurs dans un produit dont la variation est d'un ordre aussi faible?

Il est d'une autre part probable que ces diverses actions se compensent, se neutralisent dans l'énorme volume des eaux du Léman, comme nous l'avons vu pour la composition de l'eau en matières inorganiques dissoutes : que la matière organique dissoute dans l'ensemble de l'eau de ce vaste bassin est arrivée, pour sa proportion, à un état général d'équilibre et de constance que ne peuvent modifier les apports accidentels, insignifiants en regard de la masse totale du lac. Rappelons-nous que pour augmenter d'un milligramme par litre la proportion d'une substance quelconque dans l'eau du Léman, il faut un apport extraordinaire de 89000 tonnes de cette substance.

Je serais donc disposé à croire à la constance générale de la composition de l'eau du lac en matières organiques, quitte à admettre de légères modifications locales ou saisonnières sous l'influence de l'apport par les affluents et des variations de la population animale et végétale; peut-être aussi de légères différences dans la composition des eaux profondes qui sont souvent reléguées pendant de longs mois loin de la surface et de ses actions modificatrices admissibles. Je crois à la constance relative de la grande masse des eaux du lac représentée par les couches moyennes, à la variabilité relative de ses couches superficielles et très profondes.

3° *Gaz dissous.*

La quantité des gaz dissous dans l'eau du lac nous est donnée par quelques-unes des analyses que nous avons citées. Nous ne nous occuperons d'abord que des eaux de surface, renvoyant à une discussion ultérieure ce qui touche aux gaz de l'eau des profondeurs.

Voici les chiffres ordonnés par ordre des températures de l'eau :

Nos	Auteurs	Température	Oxygène	Azote	Acide carbonique	SOMMES O + N	O + N + CO^2
6	Risler	19.6°	6.80	11.87	2.88	18.7	21.6
10	Lossier	10.0	5.62	13.87	12.04	19.3	31.3
8	id.	9.7	9.50	17.35	9.90	26.8	36.7
9	id.	9.5	4.98	13.71	12.52	18.7	31.2
3	Deville	8.7	8.4	18.4	8.0	26.8	34.8
7	Lossier	6.6	10.38	17.6	4.61	27.5	32.1
4	Michaud	?	9.0	15.5	9.7	24.5	34.2

Les résultats sont trop discordants pour que nous puissions en tirer grand'chose.

La moyenne de ces diverses analyses des gaz dissous est :

Oxygène	7.8^{cm3}
Azote	15.4
Acide carbonique	8.7
Somme d'azote et oxygène	23.2
Somme totale de gaz dissous	31.9

L'eau de la surface est en rapport tellement intime avec l'air atmosphérique que nous devons la croire saturée. C'est ce qui semble, en effet, avoir lieu, pour autant que nous pouvons en juger, au milieu des divergences des diverses analyses. D'après la formule de Bunsen, l'eau pure en contact avec l'air atmosphérique, sous une pression de 730^{mm} de mercure (pression moyenne à la surface du Léman), contiendrait à saturation, en centimètres cubes de gaz dans un litre :

	Oxygène.	Azote.	Acide carbonique.
à 5°	7.3	13.6	0.6
10	6.5	12.2	0.5
20	5.7	10.7	0.3

En comparant ces chiffres avec les résultats moyens des analyses, je constate que ces dernières indiqueraient un état de saturation et souvent de sursaturation pour l'oxygène et pour l'azote, et un excès énorme pour l'acide carbonique. Nous allons revenir sur cette question.

VI. **Eau des profondeurs.**

La composition que nous avons reconnue à l'eau de surface se maintient-elle dans les profondeurs du lac, ou bien varie-t-elle, et de quelle manière ?

Les mêmes considérations générales que nous avons exposées au sujet des variations locales des eaux du lac sont ici encore parfaitement valables. En attendant que des analyses comparées aient jugé la question, je crois pouvoir l'apprécier comme suit. La grande masse des eaux du lac, les couches moyennes, doivent être de composition relativement uniforme ; elles ne reçoivent directement, en effet, aucune des eaux pluviales et fluviatiles qui diffèrent notablement des eaux lacustres ; c'est par convection mécanique et thermique que les eaux profondes et les eaux superficielles arrivent dans les couches moyennes ; les actions de mélange ont donc l'occasion de se manifester à loisir. Au contraire, les couches supérieures et les couches inférieures du lac, les eaux de surface et les eaux de grands fonds doivent être le plus différentes ; les eaux de surface reçoivent directement la pluie et les eaux légères des affluents qui s'y déversent, en des points différents, disséminés sur le contour des côtes ; les eaux des grands fonds reçoivent directement les eaux lourdes des affluents qui y viennent converger, et s'y étalent en se stratifiant en ordre de densité. Ordinairement, dans ces couches profondes, la diffusion intervient pour y produire des effets de mélange ; exceptionnellement un ouragan violent, comme celui du 20 février 1879 (v. p. 282), va remuer ces grands fonds par le courant de retour du vent ; ou bien un grand hiver, comme nous l'avons vu (p. 356), amène une circulation d'origine thermique qui fait descendre les eaux de surface jusque sur le plafond du lac. Dans les grands fonds, les actions de mélange sont donc ordinairement très lentes ; les cas où elles deviennent fortes sont très rares. Il est donc probable que les eaux lourdes des affluents, notablement différentes des eaux lacustres, y stationnent longtemps avant de se confondre dans la masse relativement uniforme des eaux moyennes du lac.

La seule analyse complète que nous ayons des eaux profondes est celle de M. Brandenbourg (N° *12*), faite sur de l'eau que j'avais prise moi-même à 250^{m} de profondeur, c'est-à-dire à 60^{m} encore

au-dessus de la plaine centrale du lac. Elle ne diffère pas trop des résultats des autres auteurs. Mais une comparaison utile n'est possible qu'entre les diverses analyses du même auteur; nous devons donc attendre que ce travail soit repris par nos amis qui étudient actuellement avec ardeur les problèmes intéressants de la chimie du lac.

Dans cet ordre de faits, M. A. Delebecque vient de publier (1) les résultats très intéressants d'analyses comparatives qu'il a exécutées sur des lacs français appartenant à des régions fort diverses : lacs d'Annecy, d'Aiguebelette et de la Girotte (Savoie), lacs de Nantua, de St-Point et de Remoray (Jura français), lac du Crozet (Isère). Contrairement à ce qui était admis jusqu'à présent, et conformément à ce que je viens d'exposer, il a trouvé une variation importante entre les eaux de la surface et celles des couches profondes. Voici quelques-uns des chiffres qu'il a obtenus pour le résidu fixe de ces eaux : (2)

	Profondeur.	Eau de surface.	Eau profonde.	Différence
Annecy	65 m	138 mg	157 mg	19 mg
Aiguebelette	71	114	160	46
Nantua	43	154	190	36
St-Point	40	152	182	30
Remoray	27	160	205	45
Crozet	37	37	27	10
La Girotte (3)	90	68	520	452

Dans tous ces lacs, les eaux de surface sont moins chargées de matières dissoutes que les eaux profondes. La différence est au maximum dans le lac de la Girotte, où M. Delebecque avait déjà auparavant indiqué la probabilité d'une alimentation profonde du lac par des sources thermales, fortement minéralisées. Pour les autres lacs, il pense, avec M. Duparc, que la différence provient d'une « absorption de matière, et principalement de carbonate de chaux, par la vie organique, plus intense à la surface que dans les profondeurs. » Dans sa note de décembre 1893, M. Delebecque étend sa proposition au Léman : « D'après les recherches toutes récentes que j'ai faites, dit-il, l'eau

(1) C. R. Acad. des sciences de Paris, 20 novembre 1893.

(2) Les prises d'eau ont été faites pour les lacs d'Annecy, d'Aiguebelette et du Crozet, en juillet et en août; celles des lacs de Nantua, de St-Point et de Remoray, en octobre 1893; celle du lac de la Girotte, en septembre 1892.

(3) C. R. Acad. sc. Paris, 27 mars 1893.

du Léman n'a pas une composition uniforme. Cette composition varie suivant la profondeur, et probablement aussi suivant la saison. » Nous attendons, avec impatience, les recherches que nous promet le savant ingénieur, recherches qui compléteront et expliqueront sa découverte.

Nous ne savons absolument rien sur les matières organiques contenues dans l'eau des profondeurs. Aucun de nos chimistes ne s'en est encore occupé.

Les gaz dissous par l'eau des diverses couches superposées dans le lac doivent nous occuper très sérieusement. En effet, tandis que la dissolution des sels et substances fixes n'est pas sensiblement influencée par la pression, celle-ci joue un rôle considérable dans la dissolution des gaz. La teneur en substances fixes peut être uniforme dans toute l'épaisseur du lac ; celle des gaz dissous peut être fort variable suivant la profondeur considérée, en raison des variations de la pression.

Au sujet des gaz dissous dans l'eau des profondeurs, nous avons d'abord les résultats obtenus par M. Brandenburg que nous venons d'indiquer dans l'analyse N° *12* faite sur de l'eau puisée, par moi-même, à 200^{m} de profondeur devant Morges, le 1er avril 1876, température de l'eau 5.6°. Il a trouvé les quantités de gaz, réduites à 0° et à 760^{mm} de mercure, en centimètres cubes par litres : (1)

Oxygène	2.3 ^{cm3}
Azote	7.7
Acide carbonique	20.6

Ces résultats diffèrent trop, soit des chiffres précédemment donnés, soit de ceux que nous allons indiquer, pour que nous les acceptions sans confirmation. M. Brandenburg lui-même a réclamé ce contrôle.

Nous devons à M. le Dr J. Walter, chimiste cantonal, à Soleure, une série très intéressante d'analyses des gaz contenus dans l'eau du lac, à différentes profondeurs (2). Il l'a extraite, en ma faveur, d'un travail d'ensemble sur la composition chimique des eaux du lac Léman, travail dont la publication se fait trop longtemps attendre. Cette série se rapporte à de l'eau que nous avons puisée, le 30 novembre 1880, devant Ouchy, à l'aide d'une bouteille (3) de l'invention de M. Walter.

(1) Bull. S. V. S. N. XVI, 156, Lausanne, 1880.

(2) *F.-A. Forel.* Faune profonde des lacs suisses, p. 44. Bâle, 1885.

(3) qui gît, hélas ! actuellement au fond du lac de Remoray.

Voici les quantités qu'il a reconnues, exprimées en centimètres cubes de gaz par litre d'eau :

Profondeur	Température	Oxygène	Azote	Acide carbonique	SOMMES	
					O+N	O+N+CO^2
0m	9.1°	6.85	14.96	2.85	21.8	24.7
60	7.7	7.46	15.74	2.90	23.2	26.1
100	5.5	6.78	15.03	6.64	21.8	28.4
150	4.9	6.98	14.61	6,22	21.6	27.8
200	4.8	7.62	15.88	5.55	23.5	29.0
300	4.6	7.08	15.94	5.28	23.0	28.3

Ces chiffres venant du même chimiste, obtenus par la même méthode, sont parfaitement comparables. Ils nous serviront de base pour notre discussion.

Je dois cependant avant tout faire des réserves sur la possibilité de variations saisonnières et annuelles, ou encore accidentelles. Ce n'est que lorsque la même série d'analyses aura été répétée plusieurs fois que nous saurons si les variations indiquées sont constantes, ou si elles ne sont que fortuites ou locales.

1° L'eau des profondeurs du Léman contient les mêmes gaz que l'eau de surface ; c'est de l'eau aérée.

2° Elle ne contient pas, en quantité appréciable, de gaz étrangers, des gaz méphytiques ou anormaux, hydrogène sulfuré, hydrogène carburé, etc.

3° Les quantités de gaz atmosphériques des eaux profondes sont à peu près les mêmes ou, si l'on veut, dans le même ordre de grandeur que celles des eaux de surface : les eaux profondes seraient saturées de gaz à la pression atmosphérique ordinaire ; mais elles ne sont pas saturées à la pression qui règne dans les couches d'où elles proviennent. Ce point est intéressant et mérite d'être expliqué.

Les liquides ont, règle générale, un pouvoir de dissolution des gaz proportionnel à la pression. Si l'eau pure est capable de dissoudre 6cm³ d'oxygène par litre à la pression de une atmosphère, elle en dissoudra 60 à 10 atmosphères, 180cm³ à 30 atmosphères. Les eaux de la couche de 300m dans les profondeurs du Léman étant sous 30 atmosphères de pression, par suite de la charge de la colonne liquide qui les surmonte, elles sont capables de dissoudre 30 fois plus de gaz que les eaux de surface.

Et cependant elles n'en contiennent pas ces quantités considérables ; elles ne font point ébullition lorsque, puisées dans les profondeurs, elles sont amenées par la bouteille à la surface, où elles sont soumises à une pression de une atmosphère seulement, ou lorsque les courants verticaux ascendants des grands vents les ramènent à la surface, à la côte sur le vent ; tandis que les eaux de surface, dans les analyses Walter, ne contiennent que 21 à 23$^{cm^3}$ de gaz oxygène et azote dissous par litre, les eaux profondes en renferment de même 21 à 23, et non pas 630 à 690$^{cm^3}$. Les eaux profondes sont légèrement sursaturées quand on les ramène à la pression de la surface, mais elles sont loin d'être saturées à la pression qu'elles subissent dans les grands fonds. Voici la raison de cette anomalie apparente :

Les couches profondes, soumises à une pression considérable, sont capables de dissoudre une plus grande quantité de gaz, mais elle ne se trouvent pas en situation d'en recevoir plus que les couches superficielles. En effet, elles ne peuvent recevoir cet excès que de l'atmosphère, et cela de deux manières :

a. Ou bien directement lorsque ces couches ont été en rapport avec la surface (l'eau des affluents avant qu'elle fût descendue dans les grands fonds par le mécanisme que nous avons étudié ; l'eau de la surface qui se refroidit en hiver et descend jusqu'à la couche correspondant à sa nouvelle densité ; l'eau de la surface qui est charriée dans la profondeur par la révolution des courants du vent), mais alors ces eaux étaient sous la pression normale, et en se saturant, elles ne pouvaient pas gagner plus d'air dissous que les eaux de surface dont elles faisaient partie.

b. Ou bien indirectement, par diffusion, les couches de surface livrant aux couches intermédiaires, qui livrent elles-mêmes aux couches profondes, les gaz qu'elles prennent à l'atmosphère. La couche de surface peut se saturer au contact de l'air et obtenir ainsi ses 21 à 23$^{cm^3}$ d'air par litre ; la couche suivante, si elle contient moins de gaz que cette quantité, peut en recevoir par diffusion de la couche de surface. Mais si la seconde couche est déjà aussi riche en air dissous que la première, la diffusion ne peut plus avoir lieu, et quelque capable qu'elle soit de dissoudre plus de gaz, cette couche sous pression plus forte ne pourra pas recevoir plus de gaz que n'en contient la couche de surface, n'étant pas en rapport avec une couche plus riche qu'elle en gaz. La diffusion ne peut se faire qu'aux dépens d'une couche con-

tenant une plus grande quantité du gaz qu'il s'agit de dissoudre.

Quelque procédé que l'on envisage, les couches profondes ne peuvent recevoir les grandes charges de gaz qu'elles seraient capables de dissoudre, vu leur haute pression ; en définitive, elles ne contiennent pas plus de gaz que les couches de surface.

4° L'eau profonde, ramenée à la pression ordinaire, est saturée de gaz à la température basse qui règne dans les couches où elle gît ; sitôt qu'après l'avoir amenée à l'air on la laisse se réchauffer, on y voit perler les bulles de gaz ; elle contient donc plus de gaz que les eaux chaudes de la surface en été. Le pouvoir de dissolution des gaz dans les liquides étant fonction inverse de la température, cela prouve que lorsque les eaux de surface, saturées de gaz, sont descendues dans les grands fonds, elles étaient froides ; ce ne sont que les eaux relativement froides des affluents, ou les eaux de surface refroidies en hiver, qui descendent dans les couches profondes du lac.

5° Dans les analyses de Walter, les quantités d'oxygène et d'azote ne varient pas sensiblement dans les diverses couches superposées ; les variations extrêmes ne sont que de 10 pour cent, ce qu'on peut bien attribuer aux conditions d'expérimentation. Les quantités obtenues, 7^{cm^3} d'oxygène, et 15^{cm^3} d'azote, sont presque exactement celles que donne la formule de Bunsen pour l'eau saturée à 5° (V. p. 618).

6° La quantité d'acide carbonique, faible à la surface et à 60^m (2.9^{cm^3}), est très forte dans les couches de 100 et de 150^m (6.4^{cm^3}), elle est un peu moins forte à 200 et à 300^m (5.4^{cm^3}). D'où provient cet acide carbonique ? Que signifient ses variations ?

L'eau en contact avec l'air atmosphérique, à l'altitude de 375^m, celle de la nappe du Léman, est saturée à la température de 5° avec 0.6^{cm^3} par litre d'acide carbonique. Les analyses de Walter trouvent dans les diverses couches du lac de 2.8 à 6.6^{cm^3} de ce gaz, par conséquent de 4 à 10 fois la teneur à saturation ; les eaux du lac sont donc, ramenées à la pression de la surface, à l'état de sursaturation. D'où provient cet excès d'acide carbonique ?

Viendrait-il de l'eau des affluents qui, comme nous l'avons dit, descend directement dans les grands fonds ? Nous n'avons pas de raison de croire cette eau fluviatile extraordinairement chargée d'acide carbonique ; dans son trajet terrestre, elle est en contact avec l'air atmosphérique, et elle se serait débarrassée de tout excès, si elle en

avait présenté originairement. De même l'eau de pluie peut être saturée d'acide carbonique, mais non sursaturée.

L'acide carbonique de l'eau lacustre est le produit des oxydations des matières organiques, soit par la respiration animale ou végétale, soit par les fermentations. La faune lacustre, en respirant, produit de l'acide carbonique, le protoplasme végétal de même ; la matière organique morte, en se putréfiant, produit de l'acide carbonique et du gaz des marais (méthane) ; ce dernier est oxydé et produit de l'acide carbonique. (1)

Cet acide carbonique est lui-même repris par la vie végétale, qui le réduit pour s'assimiler le carbone sous l'action de la lumière ; il se dégage d'autre part dans l'air par la surface supérieure du lac ensuite de la tension relativement faible de l'acide carbonique de l'atmosphère.

Plus longtemps donc une eau aura séjourné dans le lac, loin du contact avec l'atmosphère et de l'action de la lumière, plus elle contiendra d'acide carbonique. C'est ce qui nous explique comment, dans les analyses de Walter, nous trouvons les grandes proportions de ce gaz dans les couches moyennes formées, comme nous l'avons dit, de vieille eau lacustre ; nous en trouvons moins dans les couches profondes formées en partie par les eaux versées récemment par les affluents ; nous en trouvons le moins dans les eaux de surface, des couches de 0 et 60^{m} de profondeur (2), qui ont été en contact avec l'atmosphère et se sont débarrassées d'une partie de leur surcharge de gaz.

Nous attribuons donc l'acide carbonique qui est en excès dans les eaux du lac, en très grand excès dans les couches moyennes, à des phénomènes d'oxydation des substances carbonées dans l'intimité même des couches lacustres ; c'est, si nous ne nous trompons, une altération des eaux résultant de leur très long séjour dans le lac.

Mais nous entendons une objection. Une oxydation ne se fait pas

(1) Mon collègue M. le professeur E. Chuard met en doute la possibilité d'une telle oxydation du méthane. Toujours est-il que ce gaz, qui est certainement produit en grande abondance dans le sol du lac, disparaît et qu'on n'en trouve plus de trace dans les analyses des eaux du Léman.

(2) En novembre 1880, date des prises d'eau de Walter, la couche de surface descendait au moins jusqu'à 60^{m}, comme nous l'ont montré les sondages thermométriques exécutés ce jour-là.

sans absorption d'oxygène [1]; cet oxygène ne peut être tiré que de la provision de ce gaz dissous dans l'eau du lac. Nous devrions donc constater une réduction sensible des proportions d'oxygène dans les couches profondes du lac.

Cette objection est sérieuse. Et d'abord, la quantité d'oxygène nécessaire, dans notre hypothèse, à la production d'acide carbonique est énorme. Si un litre d'eau du Léman contient, en moyenne, 5^{cm^3} d'acide carbonique en excès sur les 0.6^{cm^3} de sa teneur normale, les 89 milliards de mètres cubes de l'ensemble du lac renferment 500 millions de mètres cubes, représentant 980 000 tonnes d'acide carbonique, lesquelles contiennent 270 000 tonnes de carbone et 710 000 tonnes d'oxygène. Or à raison de 7^{cm^3} par litre, l'ensemble des eaux du Léman ne contient à l'état de dissolution que 890 000 tonnes d'oxygène. Plus des deux tiers de la réserve normale d'oxygène auraient donc dû disparaître pour fournir à la production de l'acide carbonique [2]. Et cependant les analyses de Walter nous montrent dans toute l'épaisseur du lac de 6.8 à 7.6^{cm^3} d'oxygène par litre ; c'est-à-dire presque exactement la quantité normale d'oxygène que l'eau de surface peut dissoudre à la température de 5°, soit 7.3^{cm^3} par litre. Il n'y a donc pas en réalité déficit sensible d'oxygène, quoique notre hypothèse semble exiger une réduction de ce gaz au tiers au moins de la teneur constatée.

Pour résoudre cette difficulté, nous devons faire intervenir ici les phénomènes de diffusion. L'oxygène des couches profondes est en partie employé pour la combustion des matières organiques ; par diffusion, les couches superficielles qui sont constamment aérées et saturées d'oxygène, livrent, de proche en proche, la quantité de ce gaz nécessaire à combler le déficit. L'activité de la diffusion verticale de haut en bas est exagérée par la capacité croissante des couches profondes pour la solution gazeuse, capacité qui augmente directement avec la pression. Dans ces conditions, il paraît probable que la diffusion est relativement assez rapide et assez puissante pour nous expliquer la constance de la teneur en oxygène, depuis la surface jusqu'au fond

[1] Une partie de l'acide carbonique contenu dans le lac doit provenir directement, sans consommation d'oxygène, de la putréfaction des matières végétales qui se décomposent en méthane (gaz des marais) et acide carbonique.

[2] Ajoutons qu'il faudrait encore tenir compte ici de la quantité considérable d'oxygène dégagé dans l'eau du lac par la fonction chlorophyllienne des végétaux.

du lac. — Mais, dira-t-on, pourquoi n'en est-il pas de même en sens inverse pour l'acide carbonique ? Si la diffusion est assez puissante pour combler de haut en bas le déficit de l'oxygène, pourquoi ne débarrasse-t-elle pas de bas en haut, l'eau du lac, de son excès énorme d'acide carbonique ? Amené à la surface du lac, cet acide carbonique se dégagerait dans l'atmosphère jusqu'aux 0.5 ou 0.6$^{cm^3}$ par litre que l'eau sans pression est capable de dissoudre ; la diffusion devrait de même ramener à cette faible teneur en acide carbonique l'eau des couches profondes. Le cas n'est point du tout le même que pour l'oxygène. De la surface au fond du lac, la capacité de l'eau pour les gaz va en augmentant avec la pression. Etant donnée la pression considérable qui règne dans les couches profondes, celles-ci ne sont pas sursaturées d'acide carbonique ; il n'y a nulle part excès d'acide carbonique. Je mettrai en regard la quantité d'acide carbonique que seraient capables de dissoudre les couches de l'eau du lac à 5°, d'après la formule de Bunsen, et les quantités que Walter a trouvées dans ses analyses de novembre 1880 :

Profondeur.	Saturation à 5°.	Analyses Walter.	Différence.
0^{m}	0.6$^{cm^3}$	2.8$^{cm^3}$	+ 2.2$^{cm^3}$
60	3.6	2.9	— 0.7
100	6.0	6.6	+ 0.6
150	9.0	6.2	— 2.8
200	12.0	5.5	— 6.5
300	18.0	5.3	— 12.7

Il n'y a d'excès notable que dans la couche de surface qui contient cinq fois plus d'acide carbonique que ne lui en attribue la formule ; nous devons croire qu'il y a par la surface un fort dégagement d'acide carbonique dans l'air et que l'équilibre doit tendre à se rétablir ; dans la couche à 100^{m}, il y a de même un léger excès, mais il est si faible qu'on peut l'attribuer à une erreur d'analyse. Pour les autres couches, l'eau du lac est très loin d'être saturée d'acide carbonique ; la diffusion ne doit donc pas se produire de bas en haut.

En attribuant à la diffusion la capacité de maintenir la teneur en oxygène des couches profondes du lac, je ne crois pas être en opposition avec ce que je disais (page 605) sur le peu d'activité de la diffusion pour mélanger les masses d'eau versées par les divers affluents à la surface du lac. Dans ce dernier cas, il s'agissait d'une action rapide,

qui devrait s'effectuer en quelques heures ou en quelques jours. Dans le cas de la diffusion de l'oxygène dans la profondeur du lac, il s'agit d'une action de longue haleine qui se poursuit pendant les onze années que l'eau séjourne dans la cuvette du Léman. La différence de durée des actions justifie la différence dans l'efficacité que je leur accorde.

— Je résumerai cette étude sur la composition chimique des eaux du Léman en ces termes :

Dans son ensemble la teneur des eaux du lac en sels et gaz dissous est uniforme.

Elle varie cependant accidentellement d'un point à l'autre dans des proportions constatables à l'analyse.

Les couches les plus variables dans leur composition sont d'abord les eaux de surface, puis les eaux des couches très profondes ; dans les unes et les autres, le mélange des eaux apportées par les affluents ne se produit que lentement.

Les eaux les plus constantes dans leur composition, celles que l'on peut appeler les eaux lacustres par excellence, sont les eaux des couches moyennes, au-dessous des eaux de surface, au-dessus des eaux très profondes.

Quant aux gaz dissous, les eaux lacustres ramenées à la pression de la surface, sont à l'état de saturation pour l'oxygène et l'azote, à l'état de sursaturation pour l'acide carbonique.

VII. **Réserve de matières dans l'eau du Léman.**

Etant donné le volume du Léman, 89 milliards de mètres cubes, et la composition chimique de ses eaux, on peut calculer la quantité totale des diverses matières qui y sont dissoutes ; étant connu le débit moyen du Rhône de Genève, $252^{m^3 sec}$, on peut calculer la quantité des diverses matières enlevées au lac, année moyenne, par l'émissaire, et emportées à la mer. Voici le tableau de ces deux calculs :

	Dose par litre.	Quantité dissoute dans l'ensemble du lac.	Quantité enlevée par l'émissaire. Année moyenne.
Silice	3.6 mg	320 mille tonnes	28 mille tonnes
Chlorure de sodium . .	2.0	178 —	15 —
Sulfate de sodium . . .	10.4	918 —	83 —

	Dose par litre.	Quantité dissoute dans l'ensemble du lac.	Quantité enlevée par l'émissaire. Année moyenne.
Sulfate de potassium . .	3.7 mg	329 mille tonnes	29 mille tonnes
Sulfate de calcium . . .	49.8	4432 —	397 —
Carbonate de calcium . .	74.9	6666 —	588 —
Carbonate de magnésium	20.4	1815 —	163 —
Oxygène	7. cm3	890 —	
Azote	15.	1680 —	
Acide carbonique . . .	5.	880 —	79 —
Carbone du CO^2 . . .		240 —	21 —
Matières organiques . .	10. mg	898 —	80 —

Avec la quantité de silice contenue dans le lac Léman, on ferait assez de feuilles de verre de 2mm d'épaisseur pour recouvrir une superficie de 60km².

La quantité de sel de cuisine serait suffisante pour subvenir à la consommation de la Suisse entière pendant 40 ans.

Le gypse et la pierre calcaire qui y sont contenus suffiraient à bâtir une fois et demie la grande pyramide de Giseh.

Avec le carbonate de magnésie et les sulfates de potasse et de soude, on purgerait cent vingt fois la population humaine de la terre entière.

L'acide carbonique tenu en dissolution dans l'eau du lac équivaut à la quantité qui serait produite pendant 24 ans par le chauffage des chaudières des bateaux à vapeur circulant actuellement sur le Léman.

Si les matières organiques enlevées chaque année par le Rhône de Genève, et emportées à la mer, avaient la valeur du fumier de ferme, elles suffiraient à donner une bonne fumure annuelle à une superficie de vignes six fois plus étendue que le vignoble vaudois dans son ensemble.

II. DENSITÉ DES EAUX DU LÉMAN

En l'absence d'expériences directes j'avais essayé [1] de calculer la densité de l'eau du lac d'après sa composition chimique. Connaissant

[1] T. I, p. 367.

la quantité et la densité des matières dissoutes j'en tirais leur poids et le volume d'eau déplacé ; de là j'obtenais l'excès de poids de l'eau tenant des sels en dissolution.

Pour 174.1mg de résidu sec j'arrivais à une densité moyenne de 2.4. De là je faisais le calcul suivant pour la densité de l'eau du Léman :

Un décimètre cube d'eau distillée pèse	1.000 000g
j'en soustrais le poids de l'eau déplacée par les matières en solution	0.000 074
j'y ajoute le poids du résidu	0.000 174
Un décimètre cube d'eau du lac pèserait donc	1.000 100g

Donc la densité probable est 1.0001.

Mais M. Chuard m'avertissait que ce calcul était erroné ; que la contraction des matières dissoutes devait probablement amener une erreur en moins ; la densité de 1.0001 que je trouvais ainsi était probablement trop faible. — Cette erreur n'avait pas grands inconvénients pour le calcul que je faisais alors. Mais il était important de connaître la densité réelle de l'eau du Léman, et de vérifier si, selon les prévisions de M. Chuard, l'expérience directe donnerait des résultats plus forts que ceux de mon calcul

MM. Chuard et Jaccard ont satisfait à ce desideratum et ont déterminé par la méthode pycnométrique (pesée d'un ballon de volume connu, rempli d'eau) la densité de l'eau de cinq prises différentes levées devant Ouchy en février, mars et avril 1893, analyses Nos 23 à 27. La densité de l'eau du lac, rapportée à celle de l'eau distillée à la même température a, dans ces cinq expériences, été trouvée la même, à savoir 1.000 198. D'après l'approximation de la méthode la dernière décimale doit être laissée de côté, et la densité réelle être appréciée par 1.000 20.

C'est le chiffre que nous admettrons jusqu'à nouvel avis.

Mais pour appliquer la notion de la densité aux faits de la nature, nous devons lui apporter la correction de la température. La densité de l'eau qui présente un maximum à 4°, varie suivant une loi compliquée qui est exprimée par la formule de Kopp. Vu la fréquente application qui doit en être faite aux questions de la thermique du lac, je vais en donner la valeur entre 0 et 24° en admettant que 1.0000 soit la densité de l'eau distillée à 4° C. et 1.0002 celle de l'eau du Léman à la même température

Température	Eau distillée	Eau du Léman
0°	0.999 88	1.000 08
1	— 93	— 13
2	— 97	— 17
3	— 99	— 19
4	1.000 00	— 20
5	0.999 99	— 19
6	— 97	— 17
7	— 94	— 14
8	— 90	— 10
9	— 85	— 05
10	— 78	0.999 98
12	— 57	— 77
14	— 32	— 52
16	— 03	— 23
18	0.998 69	0.998 89
20	— 30	— 50
22	0.997 87	— 07
24	— 40	0.997 60

Tels sont les chiffres sur lesquels nous nous sommes basés quand nous avons étudié les phénomènes régis par la densité de l'eau dans le Léman.

III. L'EAU DU LAC LÉMAN, EAU D'ALIMENTATION

Il est une question d'un grand intérêt pour l'hygiène publique, c'est la valeur de l'eau des lacs comme eau d'alimentation.

Les villes et villages riverains des lacs vont chercher dans ces bassins naturels l'eau dont l'homme a besoin pour son alimentation, et pour les usages industriels. A mesure que les villes s'accroissent et que les habitudes hygiéniques réclament une plus grande quantité d'eau pour les nécessités de la vie, les sources et eaux terrestres deviennent plus insuffisantes ou onéreuses. Y a-t-il inconvénient, y a-t il avantage à utiliser les ressources inépuisables des lacs pour y aller puiser des eaux ?

Dans notre lac Léman la question est jugée depuis longtemps. Dès

l'année 1715, la ville de Genève a élevé l'eau du lac à l'aide de machines hydrauliques établies sur le Rhône, et à chaque génération les besoins augmentant, elle a dû accroître les quantités d'eau qu'elle livrait ainsi à sa population.

Je discuterai cette question en la traitant au point de vue théorique et au point de vue historique.

Les eaux d'alimentation d'une ville doivent satisfaire à plusieurs nécessités. Elles doivent servir à la fois d'eau potable pour l'homme et ses animaux domestiques, d'eau d'arrosage pour les plantes de ses jardins, d'eau de ménage, d'eau industrielle. Les caractères d'une eau d'alimentation et ses qualités nécessaires peuvent s'étudier sous plusieurs chefs.

I. L'eau doit contenir des substances fixes dissoutes. De l'eau de pluie, ou de neige, de l'eau distillée ne sont pas potables ; elles sont fades, insipides ; il leur manque les sels, et en particulier les sels calcaires et la silice qui font de l'eau une substance alimentaire. Sous ce rapport, les eaux lacustres sont excellentes ; celles du Léman avec

50 mg	de	sulfate de calcium
75		carbonate de calcium
4		silice

répondent aux meilleures conditions des eaux alimentaires.

On admet encore que les sels de chaux doivent, dans une eau potable, représenter au moins la moitié du résidu. Cette condition est bien remplie par l'eau du Léman avec ses 125mg de sels de chaux sur 175mg de résidu sec.

II. L'eau d'alimentation ne doit pas contenir trop de sels dissous ; un excès de sels de chaux et de magnésie la rendrait indigeste, en ferait une eau dure et non une eau douce, suivant l'expression usitée en hygiène. L'eau ne doit pas par les sels de chaux coaguler le savon, ce qui la rendrait impropre aux usages de la buanderie ; elle doit attendrir les graines de légumineuses, haricots, fèves, etc., qu'on y soumet à la cuisson.

On admet que la somme des sels dissous dans une eau potable ne doit pas dépasser 0.5g par litre, que la quantité des sels de chaux ne doit pas atteindre 0.18g par litre. Sous ce rapport les eaux du Léman sont excellentes ; elles ne contiennent comme total des résidus fixes 175mg, total des sels de chaux, 125mg.

III. L'eau d'alimentation doit contenir des gaz dissous, à savoir les gaz de l'air, oxygène, azote et acide carbonique ; elle doit être aérée.

Nous avons vu qu'à ce point de vue, l'eau du lac Léman est à l'état de saturation, ou même d'excès de saturation. Les diverses analyses nous ont donné par litre :

Oxygène	de	5.0 cm3	à	10.4 cm3
Azote	de	11.9	à	17.3
Acide carbonique	de	2.8	à	12.5

Tandis qu'à saturation dans les températures de 5 à 20°, l'eau contiendrait, d'après les formules de Bunsen :

Oxygène	de	5.7 cm3	à	7.3 cm3
Azote	de	10.7	à	13.6
Acide carbonique	de	0.3	à	0.6

Les eaux du lac sont donc à l'état de saturation ou de sursaturation pour l'oxygène et l'azote, et contiennent un excès considérable d'acide carbonique. Ce sont des eaux bien aérées, faiblement acidulées, ce sont des eaux excellentes.

Ce qui est vrai pour les eaux de surface l'est aussi pour les eaux profondes, comme l'ont prouvé les analyses de Walter. Les eaux profondes ne sont pas autre chose que de l'eau de surface transportée dans les profondeurs par des courants de convection thermique ou mécanique. Elles sont loin d'être à l'état de saturation surélevée qu'autoriserait l'excès de pression, mais elles ont le même état de saturation que les eaux de la surface.

IV. Les eaux d'alimentation ne doivent pas contenir trop de matières organiques dissoutes, sinon elles se putréfieraient facilement dans les vases où elles séjournent. On évalue à 50mg, par litre, la limite inférieure admissible pour de bonnes eaux d'alimentation.

Les analyses que nous avons citées, nous donnent, suivant les auteurs et suivant les prises d'eau, des quantités de matières organiques révélables par le permanganate de potassium variant de 5 à 15mgr par litre, la moyenne étant de 10mgr environ.

Les quantités d'acide nitrique et d'ammoniaque doivent être minimes. Les analyses de Lossier, qui ont séparé ces corps sont arrivées aux extrêmes suivants :

Acides nitrique et nitreux	0.24	à	1.61 mg
Ammoniaque	0.00	à	0.06

MM. Chuard et Seiler n'en trouvent de même que des traces très faibles ou nulles.

A ce point de vue encore, les eaux du Léman répondent aux conditions des bonnes eaux alimentaires.

V. L'eau du lac est, comme nous le verrons, habitée par une population nombreuse, animale et végétale. Animaux, plantes, protistes s'y développent en abondance et y vivent et, par le jeu admirablement balancé de leurs fonctions opposées, ils travaillent efficacement à maintenir les eaux dans un bel état de limpidité et de pureté. Sitôt que les affluents jettent dans le lac trop de matières organiques dissoutes, celles-ci sont assimilées par les plantes chlorophyllées et décomposées par les microbes de la fermentation. Les poussières organiques sont mangées par les microzoaires, les cadavres animaux sont dévorés par les animaux, ou transformés en éléments gazeux par les Bactéries, Vibrions et Microcoques de la putréfaction ; l'acide carbonique est réduit par la végétation des algues, diatomées, etc. La présence de la vie animale et végétale dans les eaux est un élément de régularisation des proportions de matières organiques et gazeuses dissoutes, un gage de la pureté des eaux.

D'une autre part, on peut en quelque sorte juger de la qualité de l'eau par le groupement des êtres qui y vivent. On connaît les sociétés biologiques des eaux marécageuses, des eaux putrides, des eaux d'égout, des eaux malsaines, on connaît de même celles qui exigent des eaux pures, vives, aérées, des eaux saines. C'est à ce dernier groupe qu'appartiennent les faunes et flores des grands lacs et en particulier celles du Léman. Parmi les animaux ou plantes qui l'habitent, bon nombre sont absolument caractéristiques des eaux de belle qualité. Ils ne sauraient vivre dans les eaux infectées. Je citerai, par exemple, certains poissons très délicats, les salmonides, entr'autres, la Truite, l'Ombre chevalier, les Corégones et encore les crustacés, l'Ecrevisse, les gammarides, les entomostracés, etc., etc. Ils nous sont une garantie de l'excellence des eaux du lac.

Il y a cependant dans la présence de ces organismes deux points à noter, intéressant la question des eaux alimentaires :

a. On pourrait craindre de voir ces animaux et plantes pénétrer

dans les canalisations et devenir un objet de répulsion et de dégoût s'ils arrivaient dans les carafes de verre transparent que nous posons sur nos tables. A cette objection répond l'expérience de Genève ; quelque nombreux que soient ces organismes lorsqu'on les étudie au point de vue zoologique, ils ne sont pas assez fréquents, en réalité, ou bien ils disparaissent dans les réservoirs et canaux qui les amènent dans les maisons, assez pour que nous n'ayons jamais entendu élever de plaintes à cet égard. Du reste, si cet inconvénient était reconnu comme sérieux, on y remédierait facilement en établissant, comme on l'a fait à Zurich, des filtres qui arrêtent toutes les particules figurées de l'eau, les poussières mortes ou vivantes qui peuvent salir les eaux du lac. A Genève, la construction de pareils filtres n'a jamais été réclamée par le public.

b. On peut se demander si, parmi les organismes vivant dans le lac, il n'y aurait pas les larves ou germes de parasites de l'homme ou des animaux. A cela, nous pouvons répondre qu'il n'y a pas une seule espèce de vers parasites de l'homme et des animaux domestiques dont les larves vivent librement dans l'eau des lacs de notre région. Une seule espèce était suspecte à ce point de vue, le Bothriocephalus latus, le Toenia large ou inerme. Mais les découvertes de M. le professeur Braun, de Dorpat (1), ont prouvé que la larve de ce parasite vit enkystée dans le corps de divers poissons et n'entre pas dans l'homme par la voie des boissons. Les expériences directes de M. le professeur Zschokke (2), alors à Genève, qui a étudié la transmission de ce ver cestoïde sur lui-même et sur ses élèves, ont achevé la démonstration en nous montrant que les poissons qui nous donnent le Bothriocéphale sont la Perche, le Brochet, l'Omble-chevalier et surtout la Lotte. Avis aux cuisinières qui, pour éviter à la famille l'invasion de ce parasite, du reste fort innocent, sont invitées à faire cuire suffisamment ces espèces de poissons.

VI. Une question plus difficile est celle des microbes ; dans ces dernières années, elle a, à juste titre, grandement attiré l'attention du public ; elle a fait faire des progrès immenses à l'hygiène et à la médecine, grâce aux travaux de Pasteur en France, de R. Koch en Alle-

(1) *Max Braun*. Ueber die Herkunft von Bothriocephalus latus. Virchow's Archiv., LXXXVIII, 119, 1882.

(2) *Fr. Zschokke*. Der Bothriocephalus latus in Genf. Centralblatt für Bacteriologie, etc. I, 377 et 409, Iéna, 1887.

magne, et de leurs émules et élèves. L'on a appris à connaître les très petits champignons aquatiques du groupe des schyzomycètes que l'on désigne sous le nom général de microbes, et que l'on classe dans les genres Bactérie, Vibrion, Microcoque, etc. On a constaté que ces êtres infiniment petits qui fourmillent dans tous les milieux liquides sont les causes efficientes des phénomènes de fermentation et de putréfaction ; on a démontré, en outre, que pénétrant dans le corps de l'homme ou des animaux, quelques-uns d'entre eux sont la cause des maladies infectieuses, fièvre typhoïde, choléra, tuberculose, diphtérie, etc.

Par des procédés fort délicats et très ingénieux de culture, dans des milieux appropriés, gélatine, bouillon, etc., on a reconnu que les microbes qui se retrouvent dans toutes les eaux, eaux de sources, eaux de rivières, d'étangs, de lacs, et cela en quantité énorme, existent en particulier dans l'eau des lacs. En 1884, MM. Fol et Dunant, de Genève (1), ont montré que les eaux de surface du lac Léman en renferment en moyenne le nombre considérable de 36 à 38 par ^{cm3}, soit 36 000 à 38 000 par litre (2). M. C. Cramer, de Zurich, en étudiant, en 1884

(1) *Fol et Dunant.* Recherches sur le nombre des germes vivants dans les eaux de Genève. Mém. Soc. phys. Genève, XXIX, n° 3, 1884.

(2) En laissant de côté les études faites sur des prises d'eau du port de Genève qui pouvaient être souillées par des causes accidentelles, je trouve dans Fol et Dunant les résultats de 10 analyses d'eau de surface de la rade de Genève faites de mars à mai 1894. Les chiffres extrêmes ont été 16 et 90 germes par centimètre cube. Si l'on choisissait les prises d'eau dans des conditions exceptionnelles de pollution (paquets d'eau fluviale versée dans le lac par un affluent ou un égout; ou de pureté (phase de refroidissement automnal qui par convection thermique entraîne les eaux de surface dans la profondeur) on arriverait facilement à des teneurs extrêmes de microbes bien plus divergentes.

— Dans son étude sur les Eaux d'alimentation de Genève [loc. cit. p. 612] M. Massol a compté les microbes de l'eau de surface dans la rade de Genève. Ses expériences ont porté sur 446 jours différents de 22 mois. Réservant une analyse plus complète de cet important travail pour notre chapitre de la Biologie du lac, nous relèverons aujourd'hui les points suivants :

a. Lorsque le lac est calme, le nombre des microbes est relativement très faible il s'élève au contraire à des chiffres considérable sitôt que le lac est agité par les vagues.

b. En temps calme, le nombre des microbes est plus faible dans les mois d'été que dans les mois d'hiver : en été, il est en général inférieur à 50 et même à 20 par centimètre cube : en hiver, il est supérieur à 50, parfois même à 100.

c. Les chiffres extrêmes observés par Massol sont : au minimum 1 dans 1^{cm3} d'eau (25 juillet 1893, sudois faible), au maximum 4125 dans 1^{cm3} (19 mars 1893, bise très forte toute la journée).

d. Quant à la nature des microbes, M. Massol n'y a pas reconnu de microbes pathogènes inquiétants.

et 1885, les eaux du lac de Zurich, est arrivé par d'autres méthodes à peu près au même chiffre [1]. N'y a-t-il pas là un fait très effrayant et propre à proscrire l'eau du lac comme eau alimentaire. C'est ce que nous allons discuter.

Et d'abord toutes les eaux naturelles contiennent des microbes, même les plus pures et les plus saines. Tandis que les auteurs que je viens de nommer comptaient une quarantaine de microbes dans un centimètre cube de l'eau des lacs de Genève et de Zurich, ils en trouvaient par les mêmes méthodes un nombre bien plus considérable dans l'eau des sources réputées les plus pures, offertes aux villes de Zurich et de Genève en opposition aux eaux des lacs. Voici les chiffres qu'ils ont donnés :

Source des Batiolettes, près Thoiry	57	microbes par cm³	Fol et Dunant.
Source du village de Thoiry	47	—	—
Arve plus de	115	—	—
Moyenne de 16 des meilleures sources des environs de Zurich	122	—	Cramer.
Moyenne de 7 des plus mauvaises sources de Zurich . .	2730	—	—

Au point de vue du nombre des microbes, les auteurs sont d'accord pour constater que les eaux des lacs sont parmi les plus pures.

En second lieu, et c'est là un point très important, tout microbe n'est pas nécessairement malsain, bien au contraire ; l'immense majorité de ces petits êtres sont parfaitement innocents. Les myriades de bactéries que nous introduisons chaque jour dans notre organisme par les boissons, par les aliments et par l'air de la respiration, ne produisent dans notre corps aucun désordre. Il est vrai, d'un autre côté, que certains microbes sont nuisibles ; qu'un seul microbe du choléra, du typhus, de la tuberculose, entrant dans notre corps, peut, s'il n'est pas dévoré par un des amibes parasites que nous nourrissons dans notre sang sous le nom de leucocytes [2], s'il trouve un milieu favorable et s'il

[1] Die Wasserbesorgung der Stadt Zürich, etc. Zurich, 1885.

[2] Je dois expliquer ce que j'entends par ces mots. Depuis bien des années déjà, j'enseigne dans mes leçons d'anatomie générale que les soi-disant globules blancs du sang ne sont pas autre chose que des parasites du groupe des Amoebiens, qui vivent dans les tissus du corps humain et animal. Comme les autres Amoebiens, ce sont des protozoaires unicellulaires doués de mouvements spontanés, et capables de se déplacer activement par le jeu de leurs pseudopodes. Ils nagent passivement dans le sang et dans la lymphe ; mais comme tant d'autres parasites animaux, ils peuvent traverser les parois des vaisseaux, et s'insinuer entre les cellules des tis-

se multiplie dans nos tissus, déterminer une maladie, peut-être mortelle ; l'on a constaté l'apparition d'épidémies de fièvre typhoïde, de choléra, par suite de l'infection des sources d'eau potable par les déjections d'individus atteints de ces maladies.

Quel est sous ce point de vue le danger que peut présenter l'eau des lacs ?

Un lac est un réservoir, où aboutissent les eaux de drainage d'un vaste bassin d'alimentation ; les égouts d'un grand nombre de villes et villages, les eaux d'arrosage des prés et des champs, les résidus de la vie d'une énorme population humaine et animale y arrivent directement ou indirectement ; c'est le rendez-vous de toutes les eaux du pays, eaux souvent sales, parfois infectées. A première vue, le danger de la propagation des maladies infectieuses paraît considérable si l'on prend l'eau d'un lac pour l'alimentation. Il est cependant des circonstances fort rassurantes qui atténuent ou annulent les chances de contamination.

a. Le volume des eaux du lac dans lequel les eaux des affluents se diluent est énorme. Pour le lac Léman, nous l'évaluons à 89 milliards de mètres cubes. En opposition à ce volume immense, la quantité d'eau nécessaire pour l'alimentation d'une ville est peu considérable. Un homme consomme par jour 1.5 litre d'eau de boisson, dont une bonne partie encore est cuite ou mélangée avec des substances désinfectantes, alcool, etc. Les probabilités d'introduction dans l'organisme de microbes infectieux, y arrivant par l'eau des boissons, sont infiniment faibles.

b. Les eaux du lac ne ressemblent en rien aux bouillons de culture dans lesquels on obtient la multiplication des organismes en question. Les bactéries infectieuses, parasites de l'homme, ne se reproduisent rapidement que dans des solutions concentrées de substances organi-

sus. Une de leurs stations favorites est dans les ganglions lymphatiques où ils se multiplient à l'envi : qu'une blessure d'un organe quelconque leur offre des conditions favorables, ils s'y reproduisent en grand nombre et forment alors une collection de pus. Ils se nourrissent entre autres des microbes qui pénètrent dans l'économie (phagocytisme de Metchnikoff) et, jouant alors le rôle de commensaux utiles, ils débarrassent l'organisme de ces parasites nuisibles. Chaque espèce animale possède son espèce d'amibe parasite, douée d'appétit plus ou moins grand pour les diverses espèces de microbes ; de là l'immunité relative dont jouissent certaines espèces animales pour les diverses infections microbiennes. Toute la biologie des leucocytes, toute la biologie des maladies infectieuses s'expliquent facilement par cette hypothèse, dont j'espère pouvoir un jour démontrer la justesse.

ques maintenues à une température voisine de celle du corps humain. Or l'eau du lac étant presque pure, et sa température étant relativement très basse, on peut espérer que la reproduction des microbes infectieux, germes des maladies de l'homme et des animaux y sera ou bien nulle ou tout au moins excessivement lente. L'eau du lac ne deviendra jamais un centre de multiplication de ces germes, un foyer de propagation de maladies infectieuses. (1)

c. Les microbes sont des organismes figurés, ce sont de petits champignons ; ils sont recherchés et mangés par tous les animaux qui basent leur alimentation sur les êtres infiniment petits. Ils ne tarderont pas à être détruits, dans le lac lui-même, par l'intervention de cette faune nombreuse que nous y constatons.

Ainsi donc, les microbes infectieux qui peuvent arriver dans le lac s'y perdent dans l'immensité de ses eaux ; ils ne s'y multiplient que peu ou pas, et ils disparaissent bientôt, mangés qu'ils sont par les autres organismes. Ces myriades de microbes que nous avons vu exister dans les eaux du lac (38 par $^{cm^3}$) ne sont point des parasites de l'homme ou des animaux ; ce sont les microbes banaux et universellement répandus de la fermentation, de la putréfaction des matières organiques. Ils ne sont pas des microbes infectieux.

C'est ce qui explique la parfaite inocuité des eaux lacustres, malgré le nombre énorme de germes qu'elles renferment.

La ville de Genève boit des eaux du lac Léman depuis l'année 1715, soit depuis 175 ans ; sauf les épidémies de typhoïde de 1881 et 1884, sur lesquelles je vais revenir, il n'y a jamais eu trace d'infection par les eaux alimentaires. Et cependant, le Léman est le grand réservoir des eaux de lavage de tout le Valais, d'une partie de la Savoie, des cantons de Vaud et de Genève: son bassin d'alimentation est de près de 8000$^{km^2}$; il y a eu parfois des épidémies de typhoïde dans les villes riveraines et des milliards de microbes infectieux sont certainement jetés chaque année dans le lac. Tous ces microbes parasites de l'homme, tous ces germes de maladie disparaissent avant d'arriver à Genève.

C'est cependant le cas de discuter ici attentivement les épidémies de Genève et de Zurich. Elles ont vivement préoccupé la population.

(1) Il faut cependant avouer que, d'après les recherches modernes, certains microbes pathogènes peuvent vivre assez longtemps, pendant des semaines tout au moins, et même se multiplier dans l'eau de source. *Cornil et Babes*. Les Bactéries I, 206. Paris 1890.

N'y trouverons-nous pas des motifs de rejeter l'eau du lac pour l'alimentation de l'homme?

A Genève, apparut au printemps de 1881, une épidémie de fièvre typhoïde qui s'étendit sur 183 cas, de janvier à juin [1]. Une nouvelle épidémie se développa en 1884; de janvier à mai, on compta 1625 cas de cette maladie, avec une mortalité de de 7.6 % [2]. Tout porte à croire que c'est par l'eau potable, puisée dans le port, que l'épidémie s'est propagée; les foyers primaires d'apparition de la maladie étaient tous, en effet, dans le périmètre alimenté par la machine hydraulique de la ville. Or c'était la première fois, depuis le commencement du siècle passé que l'on avait à se plaindre des eaux d'alimentation de Genève, et que l'on pouvait les accuser d'être la cause d'une épidémie. Qu'était-il survenu de nouveau qui ait occasionné l'infection de ces eaux jusqu'alors si saines? C'est que les conditions de la prise d'eau s'étaient notablement modifiées dans les dernières années. La ville s'était beaucoup étendue, et de nouveaux quartiers, très populeux, bâtis le long du lac, avaient de plus en plus versé leurs égouts dans le port. De grandes jetées, bâties en 1855, traversant la rade, forment actuellement de puissants remous qui entraînent jusqu'au milieu du courant les eaux des deux rives; enfin, pendant les basses eaux de l'hiver, les bateaux à vapeur, circulant dans le port insuffisamment dragué, remuent la vase du fond, entraînent derrière eux des eaux infectes et les amènent jusqu'au milieu du fleuve. Malgré ces conditions déplorables, la ville de Genève avait laissé la prise d'eau de sa machine hydraulique dans le même lieu où elle avait été établie en 1715, au milieu du pont de la Machine, c'est-à-dire dans le fleuve même, en aval du port, dans une situation évidemment très exposée à toutes les chances possibles de contamination. Instruite par l'expérience, l'administration municipale de Genève a prolongé dans l'été de 1884 la canalisation de sa prise d'eau, et a placé l'ouverture dans le lac lui-même en dehors des jetées; immédiatement l'épidémie a cessé de se développer et n'a pas reparu depuis lors. Dans les années subséquentes, on a construit un double réseau de magnifiques égouts dont les collecteurs, longeant les quais des deux côtés du lac, emmènent bien en aval de la ville toutes les eaux sales des quartiers

(1) Revue Soc. méd. Suisse romande, I. 1881 (passim).

(2) Revue Soc. méd. Suisse romande, IV. 1884 (passim).

des Pâquis et des Eaux-Vives, et le port depuis lors est purgé des causes déplorables d'infection qui existaient auparavant. (1)

A Zurich, une violente épidémie de fièvre typhoïde a apparu en 1884, et de mars à octobre s'est propagée sur 1303 cas d'infection primaire, 318 cas d'infection secondaire, ensemble 1621 cas, avec une mortalité générale de 9.1 %. L'épidémie a été causée par les eaux d'alimentation; cela est prouvé par l'étude statistique du Dr H. de Wyss (2). L'alimentation d'eau de la ville de Zurich est mixte depuis 1868 ; aux eaux de sources qui suffisaient seules avant cette date, on a adjoint les eaux du lac pompées par une machine hydraulique. La distribution géographique des cas d'infection primaire a montré que l'épidémie de 1884 a été due à l'infection des eaux venant du lac. Une critique attentive des conditions de la canalisation a prouvé jusqu'à l'évidence que les conduites d'eau étaient mal établies et mal entretenues, et que là seulement était la cause de l'événement. Tandis que la bouche de la prise d'eau allait correctement s'ouvrir dans le lac à l'origine de la Limmat, la canalisation du tube d'aspiration, mal étanche, permettait l'entrée de l'eau sur plus ou moins toute la longueur du tuyau couché dans le lit de la rivière ; l'appel de la machine attirait de l'eau puisée dans le fleuve après la traversée de toute la ville, de l'eau polluée par conséquent par les égouts d'une énorme population citadine. Une commission spéciale a été nommée pour étudier cette question : composée des hommes les plus éminents de cette ville savante, MM. Pestalozzi, Dr Zehnder, Dr H. de Wyss, Dr Cramer, Dr Lunge, Prof. Heim, Ed. Locher, Bleuler, Bertschinger, cette commission n'a pas hésité, lorsque l'administration de Zurich lui a demandé d'augmenter la quantité d'eau potable pour l'alimentation de la ville, à mettre de côté toutes les eaux de source qui lui étaient offertes, et à demander uniquement au lac le supplément d'eau qui lui était réclamé. La prise d'eau a été établie dans le lac lui-même, et une canalisation, sûrement étanche, amène désormais de l'eau à l'abri de tout soupçon.

(1) Pendant la terrible bise du 1er octobre 1894, une des plus violentes connues, la population de Genève a constaté, avec grande satisfaction, que les eaux d'alimentation de la ville étaient restées parfaitement limpides, tandis qu'en pareilles circonstances elles eussent jadis été troubles et presque inbuvables. Les travaux de correction de la prise d'eau des machines hydrauliques, qui va actuellement s'ouvrir à 2000m en amont de la ville, et à 7m de profondeur dans le lac, ont donc très bien réussi à ce point de vue (*La Tribune* de Genève, 4 octobre 1894).

(2) [Loc. cit. p. 637].

Les discussions soulevées à Genève et à Zurich à cette occasion sont fort intéressantes et instructives ; elles arrivent à conclure, avec la plus grande certitude, à l'excellence des eaux lacustres pour l'alimentation d'eau d'une ville.

Je dois signaler ici des recherches fort importantes et très intéressantes faites par le docteur L. Lortet, doyen de la faculté de médecine de Lyon, et V. Despeignes, chef des travaux de la même faculté [1]. Ces auteurs, en étudiant les eaux d'alimentation de la ville de Lyon, et plus spécialement les dépôts formés par ces eaux, reconnurent bientôt que les uns et les autres fourmillent de microbes pathogènes ; en injectant dans les couches sous-cutanées de lapins ou de cobayes une dose suffisante de ces dépôts, ils voyaient, dans la majorité des cas, et fort rapidement, l'animal mourir d'affections diverses, et l'autopsie a montré tantôt des abcès pulmonaires ou musculaires, des infarctus au foie ou au poumon, des ulcérations intestinales, une tuméfaction des plaques de Peyer, des épanchements dans la cavité des plèvres et du péritoine, de l'œdème de l'hypoderme, etc. Ce sont bien des maladies infectieuses qui ont causé la mort de ces cobayes, car une injection de quelques gouttes des liquides pathologiques ou de quelque parcelle des organes ainsi altérés déterminent bientôt chez un animal sain une maladie mortelle analogue.

Comme éléments de comparaison, M. Lortet m'a demandé de lui envoyer de l'eau et des vases du lac Léman. J'ai récolté, avec les précautions convenables, de l'eau de surface prise en plein lac ; j'ai dragué du limon à 40 et 50^{m} de fond, à 2^{km} devant Morges, dans une localité que je savais avoir un fond propre et sans pollutions spéciales. Ces produits injectés sous la peau des cobayes ont donné les mêmes résultats mortels que ceux des dépôts des eaux d'alimentation de Lyon : infection des animaux injectés directement, infection des cobayes inoculés par des liquides pathologiques provenant des premiers. Conclusion : l'eau du Léman et les vases déposées au fond du lac contiennent en abondance des germes pathogènes, mortels pour le cochon de mer.

Ces résultats étaient fort inquiétants au premier abord, et j'ai dû me préoccuper de leur signification. Si ces germes sont mortels pour le

[1] *Lortet et Despeignes.* Recherches sur les microbes pathogènes dans les eaux filtrées du Rhône. C. R. Acad. sc. Paris, 17 février 1890. — Revue d'hygiène et de police sanitaire, 1890. — *V. Despeignes.* Etude expérimentale sur les microbes des eaux. Paris, 1891.

cobaye, ne peuvent-ils pas l'être aussi pour l'homme ? Si par injection sous-cutanée, ils déterminent des accidents fatals, ne peuvent-ils pas aussi en occasionner par inoculation dans une blessure de la peau ou de la muqueuse intestinale ? N'y a-t-il pas là une raison décisive de proscrire ces eaux de l'hygiène alimentaire et de prendre des précautions spéciales dans l'hygiène publique ? Réflexion faite, je mets, en présence des faits observés par MM. Lortet et Despeignes, les faits d'expérience générale suivants :

1° L'eau du Léman, soit pure, soit salie par la vase soulevée par les vagues, ne cause pas d'infection spéciale chez l'homme. De tous temps les bateliers, pêcheurs, lavandières, baigneurs ont sans inconvénient plongé leurs membres dans l'eau du lac sans en subir d'inconvénients apparents ; que la peau soit saine et que l'épiderme intact protège contre l'introduction de germes infectieux, ou bien que des blessures permettent l'entrée des microbes, l'on n'a jamais reconnu que les lavages dans l'eau du lac occasionnent des maladies générales ou locales, ou d'infection des plaies.

2° L'eau du lac, soit pure, soit salie par la vase que soulèvent les vagues, sert depuis deux siècles à l'alimentation de la population de Genève et sauf, les épidémies de 1881 et de 1884, dont nous avons parlé et dont la cause semble accidentelle, on ne les a jamais vu causer des maladies générales ou spéciales appréciables.

3° La présence de microbes, dont plusieurs sont infectieux, n'est pas un fait spécial aux eaux de Lyon et du lac Léman. Les recherches de Fränkel, de Reimers [1] et d'autres, ont montré que le sol arable est partout et toujours rempli de germes analogues jusqu'à une assez grande profondeur.

4° Dans leurs expériences, les bactériologistes lyonnais ont toujours employé des doses massives, un centimètre cube d'eau suspecte par 100^{cm^3} du poids de l'animal ; cela représenterait pour le poids moyen de l'homme, un volume de 7 décilitres à injecter dans le tissus sous-cutané. Il est évident que l'entrée spontanée des germes infectieux par les éraillures de la peau ou des muqueuses ne peut se faire que dans des proportions minimes comparées à celles-là. On sait d'autre part que l'économie animale lutte, avec succès, contre un agent infec-

[1] Analysés in Naturw. Rundschau. II, 367. Braunschweig. 1887. V, 67. 1890. — *Cornil et Babes*. [Loc. cit. p. 213].

tieux qui y est introduit en dose minime, et qu'il arrive à s'en débarrasser, tandis qu'il succombe à une infection en masses trop brutales. Là est probablement le secret de l'innocuité des eaux du Léman lors des lavages et de l'ingestion naturelle dans l'organisme, tandis que les germes qu'elles contiennent peuvent être mortels aux cobayes quand on les injecte en quantités considérables.

Je conclus de ces considérations que les expériences de MM. Lortet et Despeignes, quoique très intéressantes et méritant toute l'attention des hygiénistes, ne doivent cependant pas nous inquiéter trop ; qu'il n'y a pas lieu, jusqu'à nouvel avis, d'incriminer l'eau du lac Léman, et de contester ses excellentes qualités d'eau alimentaire.

VII. Les eaux d'alimentation doivent autant que possible être de température constante. Cette température doit être assez basse ; les meilleures conditions hygiéniques sont celles d'une eau entre 10 et 12°. Sous ce rapport, les eaux d'un lac sont excellentes. En nous référant ici aux études que nous avons développées plus haut sur les conditions thermiques du lac Léman, je dirai que la profondeur recommandable pour l'établissement de la prise d'eau des conduits d'aspiration serait à ce point de vue à 20m environ au-dessous de la surface. A cette profondeur, les eaux de l'hiver seraient à 4° dans le Petit-lac, à 5° dans le Grand lac, les eaux d'été ne s'élèveraient jamais au-dessus de 15°, à leur point de capture ; elles resteraient le plus souvent au-dessous de 10°.

VIII. En fixant à 20m de profondeur la prise d'eau dans le lac, on aurait l'avantage d'éviter à peu près complètement les eaux de surface qui sont les plus variables au point de vue de la composition chimique et qui sont le plus salies par les poussières organiques. On serait dans la couche des eaux lacustres proprement dites et non dans la couche polluée par les eaux fluviatiles. Si l'on pouvait descendre à 30 et 40m, ce serait encore mieux ; mais l'on se heurterait peut-être à des difficultés techniques insurmontables.

Pour l'établissement d'une telle prise d'eau, je recommanderai de placer l'ouverture du canal d'appel à quelques mètres au-dessus du sol, sur le talus sous-lacustre, afin d'éviter le courant descendant des eaux lourdes des affluents et égouts, ainsi que le courant descendant des eaux littorales froides de l'hiver qui, les unes et les autres s'écoulent dans les grands fonds en suivant la ligne de plus grande pente.

IX. Un dernier point à considérer pour l'alimentation d'eau d'une ville, c'est la question d'abondance. Il faut que celle-ci soit suffisante pour les besoins actuels et futurs d'une cité dont la population s'accroîtra probablement et dont les nécessités hygiéniques réclameront un volume journalier d'eau certainement toujours plus grand. Sous ce rapport, un lac est un réservoir inépuisable, ce qui n'est pas le cas des sources terrestres, dont le débit décroît généralement à mesure que le déboisement augmente et que le climat s'altère. Une source suffisante aujourd'hui pour une ville, sera certainement insuffisante dans cinquante ans. Un lac sera toujours à même de satisfaire à tous les besoins.

En résumé, un lac comme le Léman fournit une eau d'alimentation de qualité excellente, égale ou supérieure à beaucoup de points de vue aux eaux de source. L'eau d'un lac est très recommandable au point de vue hygiénique.

IV. L'ODEUR DU LAC

L'eau du Léman est généralement inodore. Non seulement les riverains ne perçoivent aucune odeur — on pourrait objecter qu'il y a pour eux accoutumance et par suite défaut de perception — mais encore un étranger arrivant brusquement au bord du lac ne sent aucune odeur appréciable.

Cependant en certaines occasions on a noté une odeur très marquée que l'on compare ordinairement à celle de la chair de poisson. En voici une observation :

Le 27 juin 1880, par un temps pluvieux, sans vent, sur le bateau à vapeur de Villeneuve à Vevey, je remarquai une très forte odeur de poisson. Je m'assurai, en me rendant à la proue même du navire que cette odeur était répandue dans l'air du lac et ne provenait pas des cuisines du bateau. Je constatai en même temps que l'odeur était plus forte en plein lac que près de la côte ; qu'il n'y avait pas abondance extraordinaire de poissons crevés flottant à la surface du lac ou accumulés sur la grève. Je fis une enquête auprès des matelots des divers bateaux à vapeur, et j'appris que l'odeur de poisson avait été remarquée ce jour-là sur toute l'étendue du lac de Villeneuve à Genève et d'Ouchy à Evian.

Semblable observation a été répétée à plusieurs reprises par les habitués du lac. (1) Le fait est cependant rare.

Je n'ai pas d'explication à donner du phénomène. Je puis seulement en rapprocher l'observation suivante : lorsqu'avec mon filet de Müller j'ai fait une pêche d'entomostracés pélagiques, soit le filet, soit l'eau dans laquelle j'ai réuni les myriades de petits crustacés ont une odeur de poisson très caractérisée.

Il y aurait lieu de rechercher, lorsque l'odeur du lac est bien marquée, s'il n'y aurait pas arrivée à la surface d'un nombre extraordinaire des organismes pélagiques, ou une mortalité extraordinaire chez ces êtres dont les cadavres viendraient flotter à la surface de l'eau. Je n'ai pas eu l'occasion de faire moi-même cette vérification. (2)

(1) On se rappelle, à Lausanne, l'émotion désagréable causée par l'odeur très marquée du grand jet d'eau, alimenté par le réservoir des eaux de Bret, installé sur la place de la Riponne pendant le tir fédéral de 1876. Ce fait ne s'est pas reproduit.

(2) Cf. *W. Ripley Nichols.* Tastes and odors of surface waters. Transactions of the Boston Soc. of C. E., 21 décembre 1881.

FIN DU TOME SECOND.

TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE SECOND VOLUME

PAGES

PRÉFACE V
Erratas VI
Noms et termes locaux VII
Explication des signes VIII

SIXIÈME PARTIE. — **HYDRAULIQUE.**

I. Pression hydrostatique 2
II. Surface sphéroïdale de la nappe d'eau 4
Le cercle de l'horizon 6
Les parties masquées par la courbure de la terre 7
III. Des dénivellations 11
IV. Dénivellations à causes statiques 11
V. Dénivellations à causes dynamiques 16
VI. Pente et courant du lac 20
VII. Dénivellations temporaires 25
VIII. Dénivellations à causes astronomiques, marées 25
IX. Dénivellations à causes atmosphériques 29
X. Dénivellations continues 29
XI. Dénivellations rythmiques, seiches 39
1. Historique 40
Histoire ancienne des seiches du Léman 41
Histoire ancienne des seiches d'autres lacs 50
Recherches modernes sur les seiches 53
Bibliographie des seiches, de 1870 à 1892 62
2. Les vagues d'oscillation fixe des bassins limités 65
3. Méthodes d'observation des seiches 87
4. Les allures des seiches 94
Types des seiches du Léman 96

PAGES

Séries de seiches 108
La sinusoïde des seiches 112
Seiches dicrotes 113
Nomenclature des seiches 116
Description des principales seiches du Léman 119
Seiches longitudinales 119
Longitudinales uninodales 119
Longitudinales binodales 128
Longitudinales dicrotes 134
Hauteur des seiches longitudinales 136
Seiches anormales 143
Seiches transversales 145
Seiches Morges-Evian 145
Seiches Thonon-Rolle 151
Annexe. Etudes modernes sur d'autres lacs 152
Observations plémyramétriques 153
Etude limnographique des seiches du Bodan 155
Seiches du lac de Zurich 156
Seiches du lac de Neuchâtel 157
Seiches du lac George 159
Les courants de l'Eurîpe de Chalcis 163
5. Cause des seiches 168
Considérations générales 168
Statistique des seiches 170
Les actions atmosphériques causes des seiches 174
Les seiches et le temps météorologique 174
Les seiches et l'orage 184
Les seiches et la variation locale de la pression 187
Les seiches et le vent 193
Les seiches et les tremblements de terre 200
6. Conclusions sur les seiches 211
XII. Les vibrations du lac 213
1. Vibrations causées par les bateaux à vapeur 216
2. Vibrations causées par le vent 220
3. Le mascaret de la Morge 224
4. Les vibrations de la mer 227
XIII. Les vagues d'oscillation progressive 231
1. Les vagues 232
2. Les taches d'huile 241
3. Les rides de fond 249
XIV. Les courants 275
1. Le courant d'écoulement du lac 275
2. Les courants de convection thermique 276
3. Les courants causés par les vents 278
4. Les courants dus à la pression atmosphérique 282
5. Les courants des seiches 283

SEPTIÈME PARTIE. — **THERMIQUE.**

PAGES

I. Théorie générale de la thermique d'un lac 289
II. La thermique du Léman 306
1. Température de la surface 307
A. Région pélagique 307
B. Action climatique de la température du lac 322
Température pélagique et température atmosphérique . 322
Température pélagique et humidité atmosphérique . . 325
C. Température littorale 327
D. Réflexion de la chaleur solaire par la surface 333
2. Température profonde 335
A. Méthodes d'observation 335
B. Histoire de la bathythermométrie du Léman . . . 338
C. Recherches modernes 343
I. Variation annuelle 345
II. Variation cyclique 355
III. Variation journalière 360
D. Température profonde du Petit-lac 366
III. La congélation du Léman 371
1. Faits historiques 371
2. Régime thermique littoral en hiver 376
3. Phases et types de congélation 380
A. Phase de début, prise du lac 380
B. Phase d'état, congélation établie 383
C. Phase de dégel 385
4. Congélation de la rade de Genève 386
5. Congélation pélagique du Petit-lac 389
6. Congélation du Haut-lac en 1891 395
7. Glaçons de neige tenant sur l'eau du lac. 397
IV. Bilan thermique 400
V. Effet du lac sur le fleuve qui s'y repose 405

HUITIÈME PARTIE. — **OPTIQUE.**

I. Pénétration de la lumière dans l'eau 408
1. Transparence de l'eau du lac 408
A. Limite de visibilité. Méthode du P. Secchi 409
Variations saisonnières 416
Variations régionales 418
Variations locales 423
B. Causes des variations de transparence 424
C. Etudes et méthode de la Commission genevoise . . . 431
D. Limite d'obscurité absolue. Méthode photographique . 433
Chlorure d'argent 434
Iodo-bromure d'argent 440

PAGES

E. Conclusions 442
2. Ombre portée sur l'eau. Gloire 443
3. Spectre de dispersion chromatique 453
4. Illusion et grossissement des corps submergés 456
II. Couleur de l'eau 462
III. Phénomènes de réflexion 487
1. Couleur superficielle 487
2. Iris 504
3. Rayons brillants de l'image du soleil 507
4. Images de Charles Dufour 509
5. Image des corps sombres 511
6. Arc en ciel réfléchi sur l'eau 512
IV. Réfractions normales et anormales 514
1. Réfractions sur eau chaude 518
Apparence de la surface d'eau 519
Mirage 522
2. Réfractions sur eau froide 540
Phénomènes normaux 540
Apparence de la surface d'eau 541
Apparence des objets à l'horizon 542
Phénomènes accidentels 543
La Fata-morgana 544
La Fata-brumosa 551
Mirages divers 553
3. Fréquence des divers types de réfractions 559
4. Le mirage latéral 561
V. Vibrations de l'air 565
VI. Illusion de grandeur des corps flottants 566
VII. Grandeur apparente des montagnes 567

NEUVIÈME PARTIE. — **ACOUSTIQUE.**

I. Vitesse de la transmission du son dans l'eau 572
II. Transmission du son dans l'air 583

DIXIÈME PARTIE. — **CHIMIE.**

I. Composition chimique des eaux du lac 575
1. Documents originaux 575
2. Résumé des résultats d'analyse 585
3. Discussion des résultats d'analyse 587
4. Variabilité dans la composition des eaux du lac 593
1° Les actions d'alimentation 593
2° Les actions d'altération 600
3° Les actions de mélange 603

PAGES

5. Matières dissoutes dans l'eau du lac 608
1° Matières minérales 608
2° Matières organiques 610
3° Gaz 617
6. Eau des profondeurs 619
7. Réserve de matières dans l'eau du Léman 628
II. Densité des eaux du Léman 629
III. L'eau du Léman, eau d'alimentation 631
IV. L'odeur du lac 645

F. ROUGE, ÉDITEUR, LAUSANNE

LIBRAIRIE DE L'UNIVERSITÉ

4, rue Haldimand, 4

Le Léman, monographie limnologique, par F.-A. FOREL, professeur à l'Université.

TOME PREMIER. Géographie, hydrographie, géologie, climatologie, hydrologie. Vol. grand in-8, avec une carte du bassin du Léman, gravures dans le texte. Relié, 17 fr.; broché . . . . . 15 fr.

Leçons de physique expérimentale, par Henri DUFOUR, professeur à l'Université. Deuxième édition. In-4. Autographe. 493 fig. . . . 9 fr.

Les Alpes suisses, étude d'histoire naturelle, par Eugène RAMBERT, In-12 . . . . . 3 fr. 50

Catalogue de la flore vaudoise, par PITTIER et DURAND. 3 vol. in-8 7 fr. 50

Les tremblements de terre et leur étude scientifique, par A. HEIM, professeur à Zurich ; traduit par F.-A. FOREL . . . . . 50 cent.

Aide-mémoire de zoologie, par le Dr H. BLANC, professeur à l'Université de Lausanne. In-8 . . . . . 3 fr.

Zoologie, leçons destinées à l'enseignement secondaire des jeunes filles, par le même. Cours autographié avec 8 planches. In-4 . . 3 fr. 25

Guide pour l'analyse chimique qualitative des substances minérales et des acides organiques et alcaloïdes les plus importants, par le Dr H. BRUNNER, professeur à l'Université de Lausanne. Grand in-8 relié . . . . 5 fr.

Du magnétisme et de la construction des machines dynamo-électriques, par S. CHAVANNES, ingénieur. Deuxième édit. In-8 avec 2 planches 2 fr.

Autour du Léman. Nouvelles par Mme et M. RENARD, professeur à l'Université de Lausanne. In-12 avec nombreuses illustrations . 3 fr. 50

Etudes géologiques sur l'extrémité méridionale de la première chaîne du Jura, par le Dr H. SCHARDT, professeur à l'Université de Lausanne. In-8 avec une carte géologique, 3 planches de profils et un tableau statigraphique . . . . . 2 fr. 50

Eléments d'économie pure, par Léon WALRAS, professeur à l'Université de Lausanne. Deuxième édition, revue et augmentée. In-8 . 10 fr.

La Suisse sous le pacte de 1815, par B. VAN MUYDEN, avocat.

TOME PREMIER, **1813 à 1830**, in-8 . . . . . 8 fr.

TOME SECOND, **1830 à 1838**, in-8 . . . . . 8 fr.

Chaque volume se vend séparément.

LAUSANNE. — IMPRIMERIE CH. PACHE